



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

군수지원함의 추진체계별 연료 소비량에 관한 연구

A study on fuel consumption of combat support ship
according to propulsion system



韓國海洋大學交 大學院

메카트로닉스 공학과

金 珉 煜

本 論文을 金珉煜의 工學碩士學位論文으로 認准함.

委員長 蘇 明 玉



委 員 吳 珍 錫



委 員 李 相 得



2016 年 6 月 28 日

韓國海洋大學校 大 學 院

목 차

List of Tables	vi
List of Figures	vii
Abstract	ix

1. 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 국내·외 현황	5
1.3 연구내용	8

2. 해군 함정과 함정용 추진체계

2.1 해군 함정의 종류	10
2.2 함정용 추진체계의 종류	12
2.2.1 기계 추진체계	12
2.2.2 복합 추진체계	14
2.2.3 전기 추진체계	16
2.3 군수지원함의 운용 및 제원	19
2.3.1 개요	19
2.3.2 국내·외 운용 현황 및 제원	20

3. 함정의 추진체계 구성 및 평가 방법

3.1 추진체계의 구성	23
3.1.1 추진기관	26
3.1.2 추진전동기	27
3.1.3 감속기어 및 클러치	28
3.1.4 축계 및 프로펠러	30
3.2 마력과 효율의 종류 및 계산	31
3.2.1 추진기관	32
3.2.2 프로펠러	33
3.2.3 소요마력 산출 방법	33
3.3 평가 인자의 정량화 및 비교 방법	36
3.3.1 함정 평가 인자	36
3.3.2 정량화 및 비교 방법	37

4. 가상함정 및 시뮬레이션 설정

4.1 가상함정 설정	39
4.2 운항 프로파일 추정	41
4.3 운항 모드 설정	43
4.4 연료 소비량 산출 방법	46

5. 시뮬레이션 및 결과 분석

5.1 CODAD 추진체계	50
5.2 CODLOD 추진체계	54
5.3 CODLAD 추진체계	58
5.4 시뮬레이션 결과 분석	62

6. 결론

감사의 글	67
-------------	----

참고문헌	68
------------	----

Nomenclatures

A	: 실린더 단면적 [m^2]
C_{adm}	: 해군 계수
D	: 프로펠러 직경 [m]
f	: 실험에 의한 마찰 계수
g	: 중력 가속도 [m/s^2]
J	: 전진 계수
L	: 선체 전장 [m]
L_p	: 피스톤 행정 [m]
N	: 프로펠러 회전수 [rpm]
N_P	: 프로펠러의 이론상 전진 거리 [m]
n	: 기어의 잇수
P	: 프로펠러 날개 각
P_e	: 평균 유효압력 [Pa]
p	: 피치비
R	: 선체 저항 [kgf]
R_f	: 마찰 저항 [kgf]
R_r	: 잉여 저항 [kgf]
r	: 반지름 [m]
S	: 선체 침수 면적 [m^2]
T	: 추력 [kgf]
V_a	: 선박의 실제 전진 거리 [m]
V_s	: 함정 속도 [m/s]
W	: 배수량 []
η_m	: 기계효율
η_d	: 전달효율
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
τ	: 토크 [$kgf \cdot m$]
ω	: 각속도 [rad/sec]

AOE	: Combat Support Ship
BHP	: Brake Horse Power
CODAD	: COMbined Diesel And Diesel
CODAG	: COMbined Diesel And Gas turbine
CODLAD	: COMbined Diesel-eLectric And Diesel
CODLOD	: COMbined Diesel-eLectric Or Diesel
CODLAG	: COMbined Diesel-eLectric And Gas turbin
CODLOG	: COMbined Diesel-eLectric Or Gas turbine
CODOG	: COMbined Diesel Or Gas turbine
COGAG	: COMbined Gas turbine And Gas turbine
DDG	: Destructive Destroyer Guided missile
DDH	: Destructive Destroyer Helicopter
DHP	: Delivered Horse Power
EHP	: Effective Horse Power
EPS	: Electrically Powered Steering
FF	: Fast Frigate
GTG	: Gas Turbine Generator
HED	: Hybrid Electric Drive
IEP	: Integrated Electric Propulsion
IFEP	: Integrated Full Electric Propulsion
IHP	: Indicated Horse Power
IPS	: Integrated Propulsion System
LSH	: Landing Ship Helicopter
LST	: Landing Ship Tank
LPH	: Landing Platform Helicopter
LPX	: Landing Platform Experimental
PCC	: Patrol Combat Corvett
PDSS	: Propulsion Derived Ship Service
PKG	: Patrol Killer Guided missile
PKM	: Patrol Killer Medium
SFC	: Specific Fuel Consumption
SSS clutch	: Synchro Self Shifting clutch
THP	: Thrust Horse Power

List of Tables

Table 1	Republic of Korea navy ships in operation	5
Table 2	List of navy ships installed hybrid propulsion system	7
Table 3	Type of naval vessels	11
Table 4	Type of mechanical propulsion systems	13
Table 5	Type of hybrid propulsion systems	16
Table 6	Type of electric propulsion systems	19
Table 7	AOE Chun-ji class combat support ships of ROK navy	21
Table 8	Propulsion system of naval support vessels	22
Table 9	Propulsion system of frigates and destroyers	24
Table 10	Propulsion system of naval support vessels	25
Table 11	Engine specification	26
Table 12	Motor specification	27
Table 13	Method of comparison and analysis of simulation	38
Table 14	Specification of Hwacheon(AOE-59)	39
Table 15	Specification of virtual vessel	40
Table 16	Operating profile of combat support ship	43
Table 17	Operation mode of DDG-51 and CG-47 class	45
Table 18	Operation mode of virtual vessel	45

List of Figures

Fig. 1 Destroyed PCC-772 Cheonan	1
Fig. 2 Hybrid (diesel-electric) propulsion system of Rolls Royce	2
Fig. 3 HED (Hybrid Electric Drive)	2
Fig. 4 Hybrid electric drive system for CG-47 class cruisers	3
Fig. 5 AMDR (Air and Missile Defense Radar)	4
Fig. 6 LaWS (Laser Weapon System) aboard USS Ponce	4
Fig. 7 CG-47 annual fuel consumption	6
Fig. 8 Flow of simulation for fuel consumption	8
Fig. 9 Specific fuel consumption curve of gas turbine	14
Fig. 10 Increasing electric power demand on naval vessel	17
Fig. 11 DDG-1000 Zumwalt class destroyer	18
Fig. 12 Replenishment of HMAS Sirius	20
Fig. 13 MAN V28/33D diesel engine	26
Fig. 14 GE AIM (Advanced Induction Motor)	27
Fig. 15 Pitch circle of meshing gears	28
Fig. 16 SSS clutch for marine propulsion	29
Fig. 17 Fixed pitch propeller	30
Fig. 18 Controllable pitch propeller	30
Fig. 19 Calculation of maximum horsepower requirements	35
Fig. 20 The replenishment oiler HMAS Sirius	35
Fig. 21 Operating profile of naval vessel	41
Fig. 22 Set operating profile of virtual vessel	42
Fig. 23 Operation mode of DDG-51(not HED)	44
Fig. 24 Operation mode of DDG-51(HED)	44
Fig. 25 Operation mode depending on vessel speed	46
Fig. 26 Froude propeller' s law	48
Fig. 27 Fitting on SFC curve	49

Fig. 28 SFC curve for simulation	49
Fig. 29 Flow of simulation for CODAD	50
Fig. 30 LabVIEW diagram of simulation for CODAD	51
Fig. 31 Specific fuel consumption curve	52
Fig. 32 Specific fuel consumption curve fit	52
Fig. 33 Operating profile of short-term duty	53
Fig. 34 Specific fuel consumption of each speed section	53
Fig. 35 Averaged speed section by percentage	53
Fig. 36 Calculation of horsepower requirements	54
Fig. 37 Results of simulation for CODAD	54
Fig. 38 Efficiencies in diesel-electric plants	55
Fig. 39 Flow of simulation for CODLOD	55
Fig. 40 LabVIEW diagram of simulation for CODLOD	56
Fig. 41 Output of propulsion motor at low speed	57
Fig. 42 Output of diesel engine at high speed	57
Fig. 43 Flow of simulation for CODLAD	58
Fig. 44 LabVIEW diagram of simulation for CODLAD	59
Fig. 45 Calculation of maximum horsepower requirements	60
Fig. 46 Sub VI of CODLAD	60
Fig. 47 Diagram of sub VI of CODLAD	61
Fig. 48 Result of simulation for CODAD	62
Fig. 49 Result of simulation for CODLOD	63
Fig. 50 Result of simulation for CODLAD	63
Fig. 51 Deviation of fuel consumption between propulsion systems	64
Fig. 52 Comparison of advanced efficiency	65

A study on fuel consumption of combat support ship according to propulsion system

Kim, Min-wook

Department of Marine engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Last March 26, 2010, at sea near Baengnyeongdo in Republic of Korea, Patrol corvett Cheonan(PCC-772) which had been belonged to the Republic of Korea Navy 2nd fleet at that time was hit and sank during performing the duties. This was the case in the Republic of Korea Navy sailors 40 people died, 6 people were missed. The Government of the Republic of Korea was composed of civil and military joint investigation team to investigate the caused of sinking Cheonan. Investigators from five countries, Australia, the USA, Sweden, UK including the Republic of Korea experts consisting of more than 20 people, announced May 20, 2010, that the Cheonan sank under the torpedo attack by a North Korean submarine. After the incident, the Republic of Korea Navy has been provided a way to improve the ability of anti-submarine naval vessels to prepare for North Korean submarine attack, so a plan to mount an electric motor that can reduce underwater radiated noise significantly compared to internal combustion engine had been discussing as a way to prepare such submarine attack, that hybrid propulsion system will be installed on next term FFX BATCH-II frigates and AOE-II combat

support ship.

Meanwhile, the US Navy has conducted a lot of research in order to cut the fuel consumption of a large formation of warships in accordance with a fluctuation of international oil price and reduction of the national defense budgets. For example, they had developed HED(Hybrid Electric Drive) system which were installed on the DDG-51 Arleigh Burke-class mechanically propelled destroyer with four gas turbines in the last early 1990s. Using the HED system, an example of hybrid propulsion system, is shown as having a high fuel efficiency to reduce the fuel consumption compared to conventional propulsion system using only gas turbines because it operates electric motors instead of gas turbines which are features of bad efficiency during lower speed range of warship.

Also as electrical, electronic and communication technology are developed rapidly, aspects of war are being turned conventional warfare oriented naval guns into electronic warfare. Therefore linked antisubmarine, antisurface and antiair warfare are required simultaneously, so initial maximum power capacity of next term warship should be designed much bigger than conventional vessel with mechanical propulsion system. This is because RADAR weapons system such as AESA(Active Electronically Scanned Array) and PESA(Passive Electronically Scanned Array) RADAR require much electric power And in order to install and operate LaWS(Laser Weapon System) such as rail gun, the maximum power capacity must be considered. Thus, improving quietness of warship to prevent submarine attack is that reforming survivability of warship, and extending cruising range by making energy efficiency high is that improving military action and ability of achievement in case of warship. Accordingly, in this paper, we set up any virtual navy vessel based on the actual navy vessel that is operating in the Republic of Korea Navy, with the assumption that the mechanical and hybrid propulsion systems that virtual navy vessel was to be simulated the annual fuel consumption that occur during certain operating profile.

KEY WORDS : Naval vessel, combat support ship, Hybrid propulsion system, Fuel efficiency

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

2010년 3월 26일, 대한민국의 백령도 근처 해상에서 경계 임무를 수행하고 있던 해군 제 2함대 사령부 소속 초계함인 천안함 (PCC-772)이 피격되어 침몰하는 사건이 발생했다. 이 사건으로 대한민국 해군 장병 40명이 사망했으며 6명이 실종되었다. 대한민국 정부는 천안함의 침몰 원인을 규명할 민·군 합동 조사단을 구성하였다. 대한민국을 비롯한 오스트레일리아, 미국, 스웨덴, 영국 등 5개국에서 전문가 20여 명으로 구성된 합동조사단은 2010년 5월 20일, 천안함이 북한 잠수함의 어뢰공격을 받아 침몰한 것이라고 발표하였다[1].



Fig. 1 Destroyed PCC-772 Cheonan [2]

천안함 피격 사건 이후 대한민국 해군은 북한의 잠수함 공격에 대비하기 위하여 해군 함정의 대잠능력을 향상시킬 수 있는 방안을 마련해오고 있다. 그 중 하나로 내연기관에 비하여 수중 방사소음을 현저히 감소시킬 수 있는 전동

기를 추진체계에 탑재하는 방안이 논의되었고, 그 결과 FFX-II 차기 호위함과 AOE-II 차기 군수지원함에는 함정의 저속 운항 구간에서 전동기를 이용하는 복합 추진체계가 적용될 예정이다.

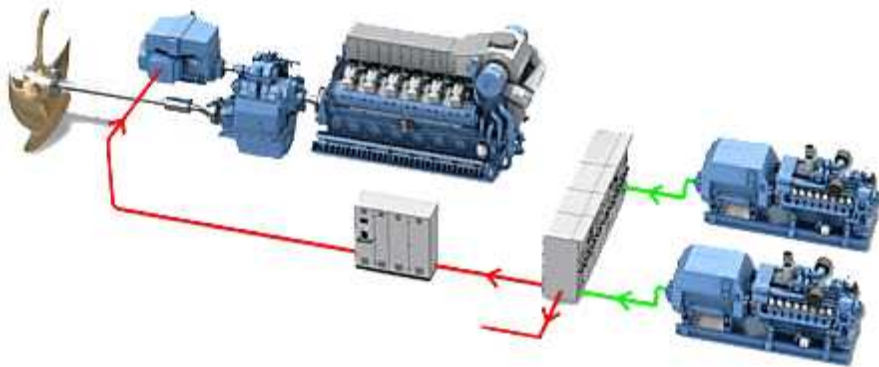


Fig. 2 Hybrid (diesel-electric) propulsion system of Rolls Royce [3]

한편, 미국 해군에서는 유가 상승 및 국방 예산 감축에 따라 함정 운용 시에 발생하는 막대한 양의 연료 소비량을 줄이기 위하여 많은 연구를 진행하고 있다. 특히 1990년대 초반부터 DDG-51 Arleigh Burke급 구축함의 가스터빈 중심 추진체계에 추진용 전동기를 설치하여 함정의 저속 운항 구간에서 연료 효율을 높이는 HED (Hybrid Electric Drive)를 개발하여 운용하고 있다. 이 연구에 따르면 함정의 저속 구간에서는 효율이 좋지 못한 가스터빈 대신 전동기를 이용하는 방식이 기존의 가스터빈만 이용하여 추진하는 방식에 비하여 연료 소비량을 절감하는 데 큰 효과가 있는 것으로 나타났다[4].

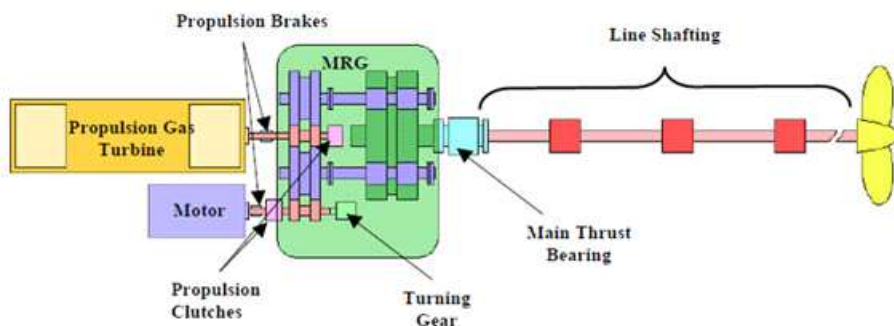


Fig. 3 HED (Hybrid Electric Drive) [5]

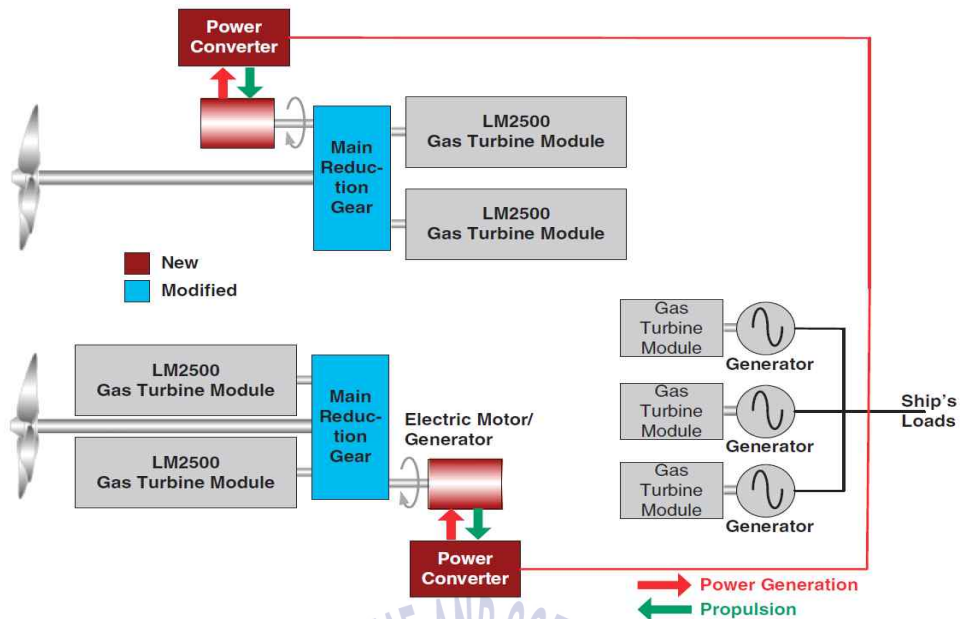


Fig. 4 Hybrid Electric Drive system for CG-47 class cruisers [6]

또한 전기·전자·통신 장비 등의 기술이 급격히 발달하면서 전쟁 양상이 함포 중심에서 전자전 (electronic warfare)으로 변화하고 있으며, 해군 함정에서는 대잠전, 대함전, 대공전 등의 복잡한 동시교전 능력을 요구하게 되었다. 이에 따라 초기 함정 설계 시 기존의 기계식 무기체계를 탑재한 함정에 비하여 차기 전투함정들의 최대 전력량을 더욱 크게 설계해야 하는 상황이 도래했다. 이는 능동식 위상배열 전자주사 (AESA, Active Electronically Scanned Array) 레이더, 수동식 위상배열 전자주사 (PESA, Passive Electronically Scanned Array) 레이더 등의 높은 전력량을 요구하는 레이더 무기체계, 그리고 향후 초전자포 (rail gun)를 비롯하여 전자 및 레이저 무기체계 등을 탑재하고 운용하기 위하여 필수적으로 고려되어야 할 사항이다.

차기 전투함정에서 요구하는 전력량이 기존에 비하여 월등하게 높아지면서 미국, 영국 등 강대국에서는 해군 함정의 추진체계, 무기체계, 전력체계 등을 통합적으로 관리 및 운용하기 위한 연구를 진행하고 있다. Fig. 5, 6은 대공 및 미사일 방어 레이더 (AMDR, Air and Missile Defense Radar)의 개념도와 실제 미 해군에서 함정에 탑재하여 운용하고 있는 레이저 무기 시스템 (LaWS, Laser

Weapon System)을 보여주고 있다.

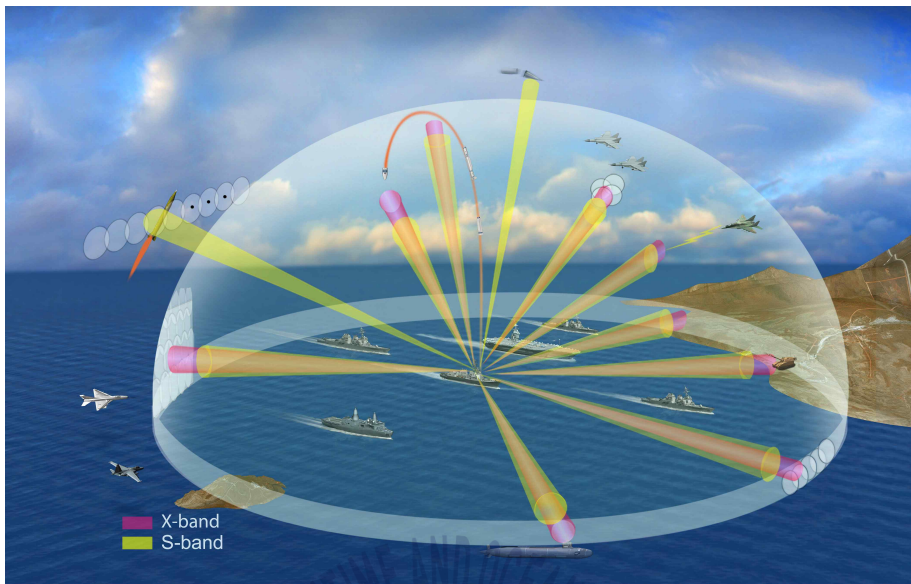


Fig. 5 AMDR (Air and Missile Defense Radar) [7]



Fig. 6 LaWS (Laser Weapon System) aboard USS Ponce [8]

1.2 국내 · 외 현황

현재 대한민국 해군에서 운용하고 있는 대부분의 함정이 디젤 엔진이나 가스 터빈 엔진을 이용한 기계 추진체계를 탑재하고 있다. 정보 수집 및 연구 등의 특수한 임무를 수행하는 함정을 제외하면 복합 및 전기 추진체계를 탑재한 함정이 전무한 상황이다. Table 1은 대한민국 해군에서 운용하고 있는 일부 함정들을 나타내고 있다.

Table 1 Republic of Korea navy ships in operation [8,9]

Figure	Description
	<ul style="list-style-type: none"> • Seoae Ryu Seong-ryong (DDG-993) • Sejong the Great-class • Destroyer • Commissioned in 2011 • COGAG system
	<ul style="list-style-type: none"> • Incheon (FFG-811) • Incheon-class • Frigate • Commissioned in 2013 • CODOG system
	<ul style="list-style-type: none"> • Yoon Youngha (PKG-711) • Yoon Youngha-class • Patrol killer • Commissioned in 2008 • CODAG system
	<ul style="list-style-type: none"> • Dokdo (LPH-6111) • Dokdo-class • Amphibious assault ship • Commissioned in 2007 • CODAD system
	<ul style="list-style-type: none"> • Hwacheon (AOE-59) • Chunji-class • Fast combat support ship • Commissioned in 1998 • CODAD system

Table 1에 따르면 대한민국 해군의 주요 함정들이 주로 디젤 엔진이나 가스 터빈 엔진을 기반으로 한 기계 추진체계를 탑재하고 있음을 알 수 있다.

최근 대한민국 해군은 함정의 대잠전 성능을 향상시키고 연료 소비량을 절감하기 위한 방안으로 FFX batch-II 차기 호위함과 AOE-II 차기 군수지원함에 복합 추진체계 탑재를 계획하고 있다.

한편 미국, 영국 등의 강대국에서는 이미 복합 추진체계를 함정에 탑재하여 운용하고 있는데, 미 해군 같은 경우 1990년대 초부터 가스터빈만으로 추진하는 DDG-51 Arleigh Burke급 구축함에 전동기를 추가로 탑재하는 HED를 운용하고 있다. HED가 적용된 함정은 저속 운항 시에는 전동기를, 고속 운항 시에는 가스터빈을 이용하여 추진력을 얻는다. 저속 구간에서 효율이 좋지 않은 가스터빈 대신 비교적 효율이 높은 전동기를 이용함으로써 함정 운용 시 발생하는 연료 소비량을 절감할 수 있다[4].

Fig. 7은 HED를 탑재한 미 해군의 CG-47 Ticonderoga급 순양함의 함속에 따른 연간 연료 소비량을 나타내고 있다.

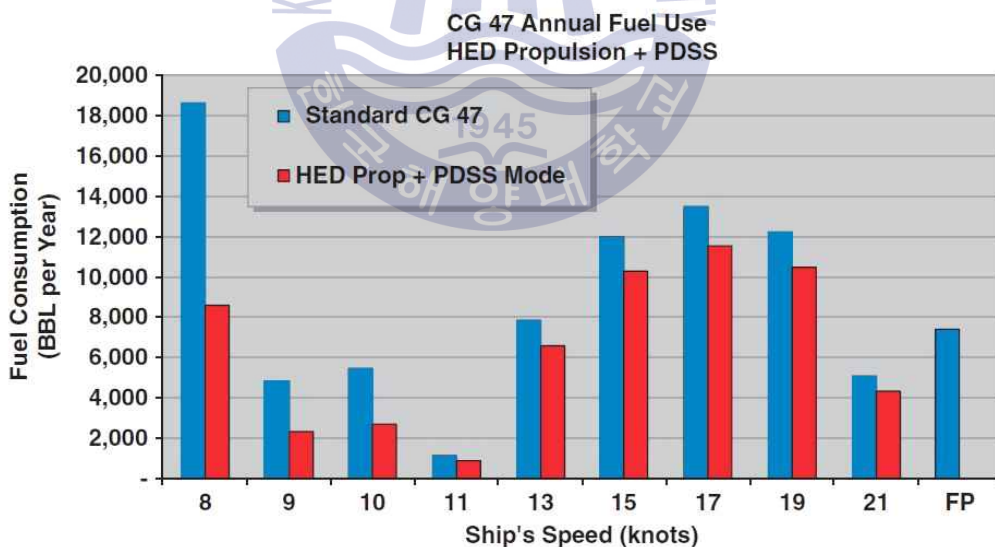


Fig. 7 CG-47 annual fuel consumption [6]

위와 같은 이유로 현재 많은 외국 해군 함정에는 복합 추진체계가 탑재되어

운용되고 있다. Table 2는 그 중 일부를 정리한 것이다.

Table 2 List of navy ships installed hybrid propulsion system [8]

Figure	Description	Nation
	<ul style="list-style-type: none"> • HMS St Albans (F83) • Duke-class (Type 23) • Frigate • Commissioned in 2002 • <i>CODLAG system</i> 	UK
	<ul style="list-style-type: none"> • HMS Bulwark (L15) • Albion-class • Amphibious transport dock • Commissioned in 2004 • <i>Diesel-electric system</i> 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Aquitaine (D650) • FREMM • Multipurpose frigate • Commissioned in 2012 • <i>CODLOG system</i> 	France
	<ul style="list-style-type: none"> • Dixmude (L9015) • Mistral-class • Amphibious assault ship • Commissioned in 2012 • <i>Diesel-electric system</i> 	
	<ul style="list-style-type: none"> • HNLMS Karel Doorman (A833) • Karel Doorman-class • Multi-function support ship • Commissioned in 2015 • <i>Diesel-electric system</i> 	Netherlands
	<ul style="list-style-type: none"> • Carabiniere (F593) • FREMM • Multipurpose frigate • Commissioned in 2015 • <i>CODLAG system</i> 	Italy

1.3 연구내용

앞서 언급한 것처럼, 해군 함정의 경우에는 잠수함 공격에 대비하기 위하여 함정의 정속성 향상이 곧 함정의 생존성을 향상시킬 수 있는 방법이다. 또 에너지 효율 향상으로 인한 최대 항속거리 확장은 함정의 작전 반경 및 수행 능력을 개선할 수 있는 방법이 된다. 특히 대규모의 함대를 운용할 때는 많은 운용비와 국방 예산이 소요되기 때문에 에너지 효율을 개선하는 것은 많은 의미를 갖는다고 할 수 있다.

이에 따라 본 논문에서는 대한민국 해군에서 운용하고 있는 함정의 제원을 바탕으로 시뮬레이션을 위한 가상함정을 설정하고, 기계 및 복합 추진체계 탑재를 가정하여 연간 운항 중 발생하는 각각의 연료 소비량에 대한 시뮬레이션을 설계 및 수행하였다.

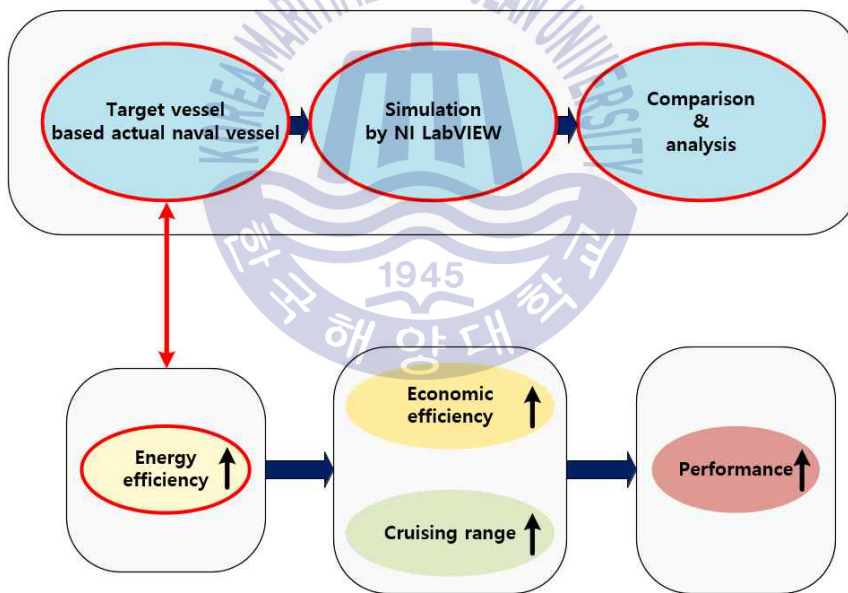


Fig. 8 Flow of simulation for fuel consumption

시뮬레이션용 가상 함정의 연간 운항 프로파일은 전투함정의 운항 프로파일을 참고하여 설정하였고, 기계 및 복합 추진체계에 동일한 운항 프로파일을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 추진체계별로 연간 연료 소비량을 비교 및 분석하여 에너지 효율 측면에서 복합 추진체계가 가지는 이점을 살펴보

았다. 본 논문은 아래와 같은 순서로 구성되어 있다.

제2장에서는 해군 함정의 종류와 함정용 추진체계, 그리고 군수지원함의 제원을 살펴보았다.

제3장에서는 함정 추진체계의 구성과 마력 및 효율의 계산 방법, 그리고 함정의 평가 인자를 살펴보았다.

제4장에서는 시뮬레이션 대상이 되는 가상함정을 설정하며, 운항 프로파일, 운항 모드, 연료 소비량 산출 방법을 정리하였다.

제5장에서는 추진체계별로 연간 연료 소비량을 시뮬레이션 하여 결과를 그래프로 나타내었으며, 6장에서 결론으로 끝을 맺었다.



제 2 장 해군 함정과 함정용 추진체계

2.1 해군 함정의 종류

우리나라 해군에서 운용하고 있는 함정의 종류에는 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 잠수정 및 잠수함을 제외한 수상함에 대하여 조사한 자료를 바탕으로 각 함정의 종류별 특징을 정리하였다. 일반적으로 전투능력이 가장 중요한 요소로 평가되는 전투함의 경우에는 함정의 기동성이 중요하기 때문에 함정의 기본 및 상세 설계 시에 함정의 최고 속력을 높게 설계하게 된다. 구축함의 경우를 예로 들면, 약 5,000 ton 이상의 만재배수량을 가지면서 최고 속력은 30 knot 이상으로 설계되어 운용되고 있다. 호위함은 만재배수량이 약 3,000~5,000 ton, 초계함은 약 1,000 ton의 만재배수량을 갖는다. 이 두 함정은 구축함보다 크기와 배수량이 작고 최고 속력은 비교적 빠른 편이다. 고속정은 만재배수량이 100~500 ton 정도이고, PKM 참수리급이 약 37 knot, PKG 율령하급이 44 knot로 해군 함정 중에서 가장 빠른 편으로, 중·소형의 전투함 및 경비정은 일반적으로 최고 속력이 약 30 knot 이상이라는 것을 알 수 있다[9].

해군은 수송함, 상륙함, 군수지원함 등의 함정도 운용하고 있는데, 이 함정들은 배수량과 상관없이 함정의 기본 및 상세 설계에 있어서 전투함정에 비하여 최고 속력을 비교적 낮게 설계한다. 그 이유는 함정의 기동성이 작전 수행 능력과 큰 연관이 없기 때문이다. 따라서 같은 기계 추진체계를 탑재한 함정이라고 해도 주요 임무와 작전 수행 능력에 맞게 추진 기관과 추진 방식은 다르게 설계된다. Table 3은 해군에서 운용하고 있는 함정의 유형과 각각의 주요 임무를 간략하게 설명하고 있다.

Table 3 Type of naval vessels [8,9]

Figure	Type of vessel	Main task
	구축함 DDH, Destroyer Helicopter DDG, Destroyer Guided missile	대잠, 대공, 대함 작전을 동시에 수행할 수 있는 중소형 전투함
	호위함 FF, Fast Frigate	구축함보다 소형, 고속이고 경무장을 탑재하여 주로 해상전, 정보수집 및 관측 등의 임무를 수행
	초계함 PCC, Patrol Combat Corvett	호위함의 열세한 대잠 및 대함 능력을 갖추어 연·근해의 초계임무를 수행
	고속정 PKM, Patrol Killer Medium PKG, Patrol Killer Guided missile	주로 연·근해의 경비임무를 수행
	대형수송함 LPX, Landing Platform Experimental LPH, Landing Platform Helicopter	병력, 탄약 등을 대량으로 운반할 수 있는 함정
	상륙함 LST, Landing Ship Tank LSH, Landing Ship Heavy	병력, 탄약 등을 적의 해안이나 작전지역에 상륙
	군수지원함 AOE, combat support ship	장기간의 해상작전에서 지속적인 임무 수행을 위해 유류, 탄약, 청수 등의 군수물자를 보급

2.2 함정용 추진체계의 종류

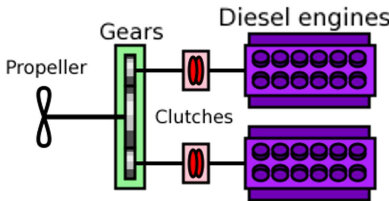
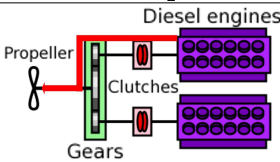
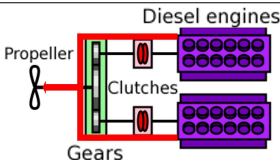
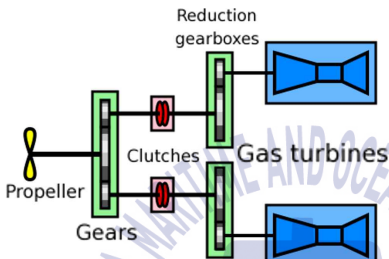
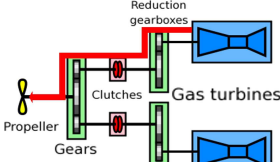
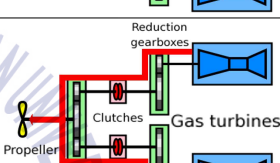
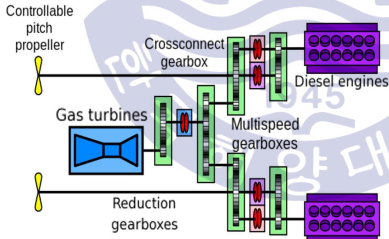
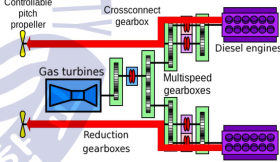
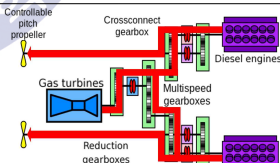
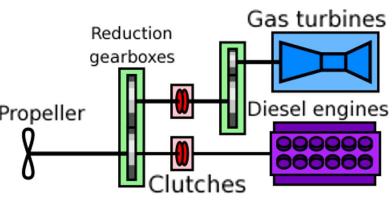
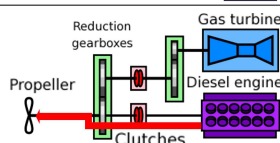
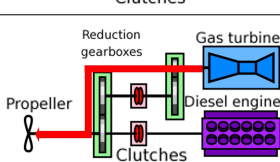
2.2.1 기계 추진체계

기계 추진체계는 기존에 운용 중인 대다수의 선박 및 함정에 탑재되어 있다. 일반적으로 디젤 엔진을 이용하여 축을 회전시키고 프로펠러가 배의 추진력을 발생시키는 경우를 대표적인 사례로 들 수 있다. 또 해군 함정과 같이 고속의 추진력이 필요한 경우에는 가스터빈 엔진과 같은 고출력의 추진기관을 탑재하여 운용하기도 한다. 디젤 엔진과 가스터빈 엔진 같은 추진기관들은 선박이나 함정의 전력 부하에는 관여하지 않고 기타 전기기기의 도움 없이 오로지 축을 회전시킴으로써 추진력을 발생시키기 때문에 이런 방식의 추진체계를 ‘기계 추진체계 (mechanical propulsion system)’ 라고 한다[10,11].

해군 함정은 일반적으로 2개의 축을 가지고 있으며 하나의 축에 1대 혹은 2대의 추진기관이 연결된다. 탑재되는 기계 추진체계의 종류에는 순항 및 고속 구간에서 모두 디젤 엔진을 사용하는 CODAD (COmbined Diesel And Diesel), 순항 및 고속 구간에서 모두 가스터빈 엔진을 사용하는 COGAG (COmbined Gas turbine And Gas turbine), 순항 속력 구간에서는 디젤 엔진을 사용하고 고속 구간에서는 디젤 엔진과 가스터빈 엔진을 함께 사용하는 CODAG (COmbined Diesel And Gas turbine), 그리고 순항 속력 구간에서는 디젤 엔진을 사용하고 고속 구간에서는 가스터빈 엔진만을 사용하는 CODOG (COmbined Diesel Or Gas turbine)가 있다.

추진체계의 종류를 보면 하나 혹은 두 개의 축에 2대 이상의 추진기관이 탑재되는 경우가 많은데, 영문 표기가 의미하는 것처럼 추진체계의 종류를 나타낼 때 최고 속력에서 탑재된 추진기관을 동시에 운전하는 경우 ‘And’ 로 표현하고, 순항 및 최고 속력에서 운전하는 추진기관이 서로 다른 경우에 ‘Or’ 로 표현한다. Table 4는 기계 추진체계의 종류와 특징을 설명하고 있다.

Table 4 Type of mechanical propulsion systems [8]

Classification	Configuration	Operation
<ul style="list-style-type: none"> • CODAD system • DE and DE • installed on AOE, LST ect. 		 <p>Cruising speed</p>
		 <p>Maximum speed</p>
<ul style="list-style-type: none"> • COGAG system • GT and GT • installed on DDG ect. 		 <p>Cruising speed</p>
		 <p>Maximum speed</p>
<ul style="list-style-type: none"> • CODAG system • DE and GT • installed on PCC ect. 		 <p>Cruising speed</p>
		 <p>Maximum speed</p>
<ul style="list-style-type: none"> • CODOG system • DE or GT • installed on FF ect. 		 <p>Cruising speed</p>
		 <p>Maximum speed</p>

2.2.2 복합 추진체계

복합 추진체계는 함정이 순항 속력 이하의 저속으로 운항할 때, 즉 추진용 내연기관의 부하율이 낮아지는 조건에서는 함정의 소음과 진동이 커지고 연료 효율이 낮아지므로 이러한 문제를 해결하기 위하여 추진용 전동기를 탑재한 추진체계이다. 디젤 엔진이나 가스터빈 엔진과 같은 내연기관은 부하율이 낮은 조건에서 연소 상태가 악화된다. Fig. 9를 보면 저부하 구간일수록 가스터빈 엔진의 연료 소비율이 높아진다.

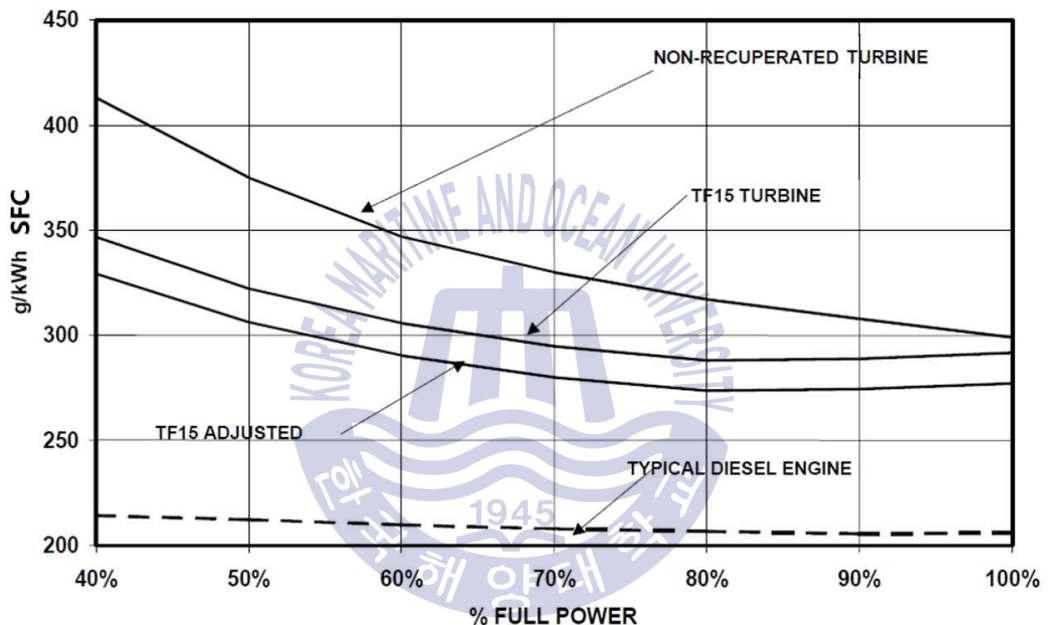


Fig. 9 Specific fuel consumption curve of Gas turbine

해군 함정은 운항 중 방사소음이 클수록 적의 잠수함에게 노출되기 쉽기 때문에 함정의 생존성에 치명적인 결과를 초래한다. 따라서 부하율이 낮을 경우에는 추진용 내연기관 대신에 추진용 전동기를 이용하여 함정을 운항하는 것이 ‘복합 추진체계(hybrid propulsion system)’의 특징이다. 이는 2010년 3월 26일, 백령도 부근에서 발생한 ‘천안함 피격 사건’ 이후 함정의 대잠 능력을 강화하는 방안의 일환으로 대한민국 해군에 있어 그 중요성이 더욱 커졌다.

또한 복합 추진체계는 연료 효율을 향상시킨다는 점에서 국제 원유 가격으로

부터 받게 되는 영향을 감소시킬 수 있다. 이는 함대 규모가 커질수록 운영 및 관리에 필요한 국방예산을 절약할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 환경오염이 국제적인 문제로 대두되면서 해상에서 발생하는 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx) 등의 배출 규제가 강화되었는데, 복합 추진체계는 이러한 배출 가스를 절감할 수 있어 지속적으로 연구 및 개발되고 있다[12,13]. 향후 발전기와 컨버터 등의 전력 변환 효율 등 전력·전자·전기 기술이 발전함에 따라 그 효과는 더욱 뚜렷해질 것으로 보인다.

복합 추진체계의 종류에는 CODLOG (COmbined Diesel-eLectric Or Gas turbine)와 CODLAG (COmbined Diesel-eLectric And Gas turbine)가 있다. 이 두 가지 방식은 모두 순항 속력 이하일 때 디젤 발전기를 이용하여 추진용 전동기만으로 함정의 추진력을 발생시키는데, 고속 구간에서 가스터빈 엔진만 운용하는 방식을 CODLOG, 추진용 전동기와 가스터빈 엔진을 모두 운용하는 방식을 CODLAG라고 한다.

앞서 설명한 방식과 조금 다른 것으로 복합 추진체계의 일종인 HED가 있다. 이는 1990년대 초반에 미국의 DDG-51 알레이 버크 (Arleigh Burke)급 구축함의 연료 효율을 향상시키기 위해 연구된 것으로 기존의 기계 추진체계에 전동기를 추가로 설치하여 함정의 저속 운항 시 연료 소비량을 감축하는 것이 그 목적인다고 할 수 있다. 초기 DDG-51 알레이 버크급 구축함에는 COGAG 방식의 추진체계가 탑재되어 있었는데, 여기에 추진용 전동기가 추가되었으므로 HED는 COGAG 추진체계를 개조하여 연료 효율을 높인 방식이라고 볼 수 있다[14].

복합 추진체계는 함정의 작전 상황과 운항 속력에 따라 탑재된 추진기관을 선택적으로 운용함으로써 보다 효율적인 운항이 가능하다. 예를 들어 평상시에는 운항 속력에 따라 저속 구간에서는 전동기를, 고속 구간에서는 디젤 엔진이나 가스터빈 엔진을 이용하고, 전투 중에는 최대 출력으로 운항하는 등, 여러 운항 모드로 구동할 수 있다. Table 5는 복합 추진체계의 종류와 특징을 나타낸 것이다.

Table 5 Type of hybrid propulsion systems [8]

Classification	Configuration	Operation
<ul style="list-style-type: none"> • CODLOG system • PM or GT • installed on TYPE-23(FF, UK) • FREMM(FF, France) 		<div> <p>Cruising speed</p> </div> <div> <p>Maximum speed</p> </div>
<ul style="list-style-type: none"> • CODLAG system • PM and GT • installed on TYPE-26(FF, UK) • FREMM(FF, Italy) 		<div> <p>Cruising speed</p> </div> <div> <p>Maximum speed</p> </div>
<ul style="list-style-type: none"> • HED system • PM or GT • installed on DDG-51(DDG, USA) 		<div> <p>Cruising speed</p> </div> <div> <p>Maximum speed</p> </div>

2.2.3 전기 추진체계

차세대 무기체계 기술이 발달하면서 대공 및 미사일 방어 레이더인 AMDR, 레이저 무기체계인 LaWS, 레일건, 자유 전자 레이저(free electronic laser) 등의 높은 전력을 요구하는 장비들이 연구되고 있으며, 그 중 일부는 함정에 탑재되고 있는 실정이다. 이에 따라 차세대 전투함정에서는 재래식 무기체계가 탑재된 함정에서의 전력 소모량보다 월등히 높은 전력이 필요하다. 이 함정들

은 전력 생산을 위하여 디젤 엔진이나 가스터빈 엔진 같은 내연기관을 운영하고 있고, 함정의 추진을 위해서는 추진용 전동기만을 운영하고 있기 때문에 ‘전기 추진체계 (electric propulsion system)’ 라고 부른다.

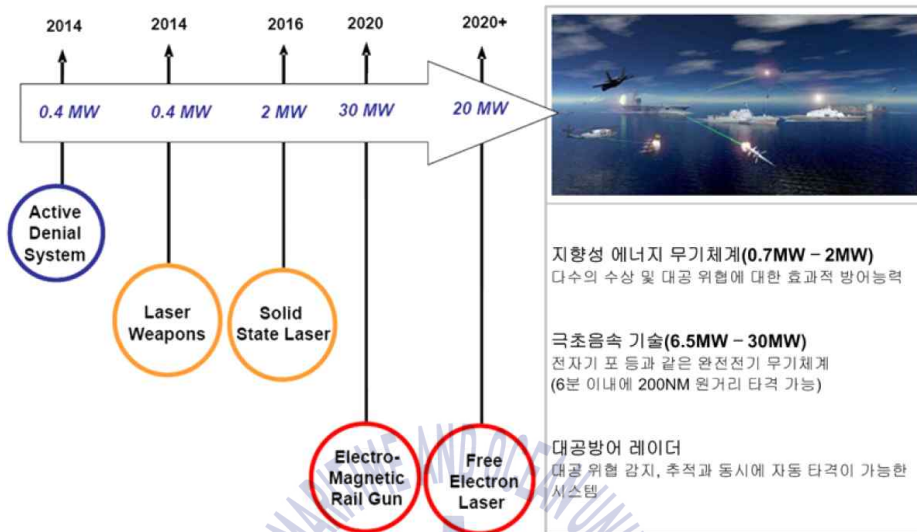


Fig. 10 Increasing electric power demand on naval vessel [15]

앞서 언급한 것처럼 전기 추진체계에서는 함정의 추진력을 생산하는 추진기관으로써 내연기관을 채택하지 않고 있다. 순항 속도 이하로 운항할 때 추진용 전동기로 추진력을 얻는 복합 추진 함정 같은 경우에도 고속 구간에서는 내연기관을 운영하고 있지만, 전기 추진 함정은 모든 항속 구간에서 추진용 전동기를 운영하고, 디젤 엔진이나 가스터빈 엔진 같은 내연기관은 오직 함정에서 요구하는 충분한 전력을 생산하기 위하여 운용되는 것이 큰 차이점이다.

전기 추진체계를 가리키는 용어에는 통합동력시스템(IPS, Integrated Power System)과 통합전기추진(IEP, Integrated Electric Propulsion) 등이 있다[3,11]. 전기 추진체계가 등장하기 전에는 추진체계에 필요한 추진기관과 함정의 전력 생산을 위한 발전체계가 별도로 구성되어 있었으나, 해상에서의 전장 환경이 복잡해지고 함정 임무의 다목적화 및 생존성의 극대화 등 군사과학 기술에 대한 다양한 요구가 차츰 이루어지면서 함정에서 요구하는 전력량이 대폭 증대되었다. 이에 따라 추진기관과 발전기관을 구별하지 않고 발전기관의 용량을 증대시킴으로써 통합적으로 운용하게 되었다. 이에 따라 기존까지 주로 추진기관으

로 탑재되었던 디젤 및 가스터빈 엔진이 발전기의 역할을 수행하게 되며, 소요 전력량의 각 단계마다 이들 엔진의 운전 대수와 부하율을 조정하게 된다. 즉, 함정의 소요 전력량에 따라서 DG (Diesel Generator)와 GTG (Gas Turbine Generator)를 선택적으로 운용하게 된다.

IPS가 적용된 실제 함정 중 대표적인 것으로 영국 해군에서 운용하고 있는 TYPE-45 DDG(HM (Destroyer with Guided missiles, Helicopter hangar and surface-to-air Missiles)과 미국 해군에서 운용 중인 DDG-1000 이 있다[8]. 이런 전투함정들은 기본적으로 높은 전력을 요구하는 레이더 무기를 비롯한 많은 전자 무기체계가 탑재되어 있으며, 가스터빈 엔진이 비교적 높은 연료 효율로 운용될 수 있어 전기 추진체계의 이점을 최대화할 수 있다. Fig. 11은 전기 추진 체계를 탑재한 미 해군의 DDG-1000을 나타내고 있으며, Table 6은 전기 추진 체계의 운용 방식을 간략히 나타내고 있다.



Fig. 11 DDG-1000 Zumwalt class destroyer [8]

Table 6 Type of electric propulsion systems [8]

Classification	Configuration	Operation	
<ul style="list-style-type: none"> • IPS • IEP system • IFEP system • only PM • installed on DDG-1000 (DDG, USA) TYPE-45 (DDG, UK) 			Cruising speed
			Maximum speed

2.3 군수지원함의 운용 및 제원

2.3.1 개요

본 논문에서는 함정의 연간 연료 소비량에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 대한민국 해군에서 운용 중인 군수지원함의 제원을 참고하였다.

군수지원함은 해군 함대가 오랜 기간 동안 작전을 수행할 때 연료유, 윤활유, 청수 등을 해상에서 보급하는 역할을 수행한다. 작전 기간이 길 때 해상 보급이 반드시 필요한데, 이때 보급이 필요한 함정에 근접하여 대상 함정이 필요로 하는 군수 물품을 보급 및 지원하는 것이 군수지원함이다[9,17].

군수 지원에는 일반적으로 두 가지 방법이 있는데, 육상의 기지에 부대가 직접 접근하여 필요한 지원을 받는 것을 ‘육상 근접 지원’ 이라고 하고, 해상에서 군수지원함이 대상 함정에 접근하여 군수 보급 및 지원을 수행하는 방법을 ‘해상 기동 군수 지원’ 이라고 한다. 육상 근접 지원 같은 경우 작전에 투입될 군수지원함이 필요하지 않기 때문에 경제적인 측면에서는 이점을 갖지만, 육상에 있는 기지에서만 보급이 이루어지기 때문에 해상에서 작전 중인 함정도 기지로 접근해야만 하는 치명적인 단점을 갖고 있다. 이에 해외 강대국들은 앞

서 설명한 것처럼 함대의 지속적인 작전 및 임무 수행을 위하여 해상에서의 군수 지원을 위한 전력을 양성하였으며, 이런 운용 현황은 대양해군으로의 발전을 준비하는 대한민국 해군에게 많은 것을 시사한다[17]. Fig. 12는 해상 기동 군수 지원 중인 HMAS Sirius를 보여주고 있다.



Fig. 12 Replenishment of HMAS Sirius [16]

2.3.2 국내·외 운용 현황 및 제원

현재 대한민국 해군에서는 AOE 천지급 함정 3 척을 군수지원함으로 운용하고 있다. 1991 년에 AOE-57 천지함을 시작으로, 1997 년에 AOE-58 대청함, 1998 년에 AOE-59 화천함이 순서대로 건조되었다. 배수량은 경하 약 4,200 ton, 만재 약 9,113 ton이며, 추진기관으로 디젤 엔진 2 대가 2 개의 축에 각각 연결되어 있다. 항속 거리(한 번 보급 받은 상태에서 운항할 수 있는 가장 먼 거리)는 약 8,300 km이며, 최고 속력과 순항 속력은 각각 20 knot, 15 knot로 설계되었다. Table 7, 8은 국내·외 해군에서 운용하고 있는 여러 군수지원함의 제원을 나타내고 있다.

Table 7 AOE chun-ji class combat support ships of ROK Navy [8,9]




Name	AOE-57 Chun-ji	AOE-58 Dae-cheong	AOE-59 Hwa-cheon
Figure			
Commission	1991	1997	1998
Propulsion system	CODAD (COMbined Diesel And Diesel) Diesel engine × 2 EA / Shaf t × 2 EA 6,400 HP (approx. 4,800 kW) each		
Displacement (ton)	4,200 (light) / 9,113 (full)		
Speed	20 knot (max.) / 15 knot (cruising)		
Length	136 m		
Beam	17.8 m		
Draught	6.5 m		
Range	8,300 km / 4,500 nm		

Table 8 Propulsion system of naval support vessels [8]

Propulsion system	Name (Type)	Operator	Displacement (ton)	Max. speed (knots)	Engines & Generator
단순 연결 or CODAD	Fort Victoria (Replenishment oiler)	UK	32,800	20	2 Shaft DE × 1EA
	Berlin (Replenishment oiler)	Germany	20,240	20	2 Shaft DE × 2 EA
	Durance (Replenishment oiler)	France	17,800	19	2 Shaft DE × 2 EA
	Karel Doorman (Support ship)	Netherlands	28,250	18	2 Shaft Diesel-electric
	Towada (Support ship)	Japan	15,000	22	2 Shaft DE × 2 EA
	Hwa-cheon (Support ship)	Korea	9,110	20	2 Shaft DE × 2 EA
	Etna (Auxiliary ship)	Italy	13,400	18	2 Shaft DE × 2 EA

Table 7, 8에서 확인할 수 있듯이 만재 배수톤수와 최고 속도, 축과 추진기관
의 개수 등에서는 차이가 있지만 추진체계는 대부분 디젤 엔진만으로 이루어져
있는 기계 추진체계를 탑재하고 있다. 최근에는 이러한 추세에도 변화가 생기
고 있어 함정의 정숙성 및 연료의 효율 향상 등을 위하여 디젤 발전기를 이용
하여 전동기로 추진하는 복합 추진체계를 탑재하는 군수지원함도 건조되고 있
다.

제 3 장 함정의 추진체계 구성 및 평가 방법

3.1 추진체계의 구성

일반적으로 선박이나 함정의 설계 과정에서는 주요 임무 및 부수적 임무와 함께 운항 속도, 항속 거리, 선체 구조 및 강도, 복원 성능, 조종 성능 등을 고려하게 된다. 상선의 경우에는 그 과정에서 화물의 종류 및 적재량, 운항 성능에 따른 경제성 등이 중요한 요소로 작용하지만 해군 함정의 경우에는 전투 능력이 우선적으로 고려된다.

함정의 전투 능력은 추진체계에 따른 최고 속력과 최대 작전 거리, 무기체계에 따른 탐지거리와 사정거리 등에 의하여 결정되는데, 함정의 추진체계를 설정할 때는 임무 수행의 성격을 고려해야 한다. 예를 들어 구축함, 호위함 등과 같이 전투 임무를 주로 수행하는 함정의 경우 우수한 기동성을 갖추어야 하므로 가스터빈 엔진을 탑재하여 기동성을 극대화하게 되지만, 상대적으로 추진기관의 효율이나 함정 운용의 경제성은 중요도가 낮아지게 된다. 반면에 전투가 주요 임무가 아닌 경우에는 디젤 엔진을 탑재함으로써 최고 속력을 비교적 낮게 설계하여 운용한다.

Table 9, 10을 통하여 실제로 국내·외 해군에서 운용 중인 함정들이 어떤 추진체계를 통하여 운항되고 있는지 알 수 있다. 먼저 Table 9는 기동성이 강조되는 전투함정들을 보여주고 있는데, 고속 운항 시에는 거의 모든 전투함정들이 가스터빈 엔진을 운용함으로써 높은 추진력을 얻는 것을 알 수 있다. 또 Table 10은 해상 보급 유조선이나 상륙함, 강습함 등 전투 외의 임무를 수행하는 함정들을 보여주고 있다. 국내에서 운용 중인 함정뿐만 아니라 상당수의 함정이 20 knot 내외의 최고 속력으로 운항되고, 모든 속도 구간에서 디젤 엔진을 운전함으로써 추진력을 얻는 것을 알 수 있다.

Table 9 Propulsion system of frigates and destroyers [8]

Propulsion system	Name(type)	Operator	Displacement (ton)	Max. speed (knot)	Engines & Generator
CODOG	FFX Batch-I (Frigate)	Korea	3,250	30	DE × 2 EA GT × 2 EA
	Lupo (Frigate)	Peru	3,000	35	DE × 2 EA GT × 2 EA
	Georges Leygues (Frigate)	France	4,500	30	DE × 2 EA GT × 2 EA
CODAG	F-124 (Frigate)	Germany	5,800	29	DE × 2 EA GT × 1 EA
	F-310 (Frigate)	Norway	5,290	28	DE × 2 EA GT × 1 EA
CODLOG	FREMM (Frigate)	France	6,000	27	EM × 2 EA DG × 4 EA GT × 1 EA
	TYPE-26 (Frigate)	UK	8,000	26	EM × 2 EA DG × 4 EA GT × 1 EA
CODLAG	TYPE-23 (Frigate)	UK	4,800	28	EM × 2 EA DG × 4 EA GT × 2 EA
	F-125 (Frigate)	Germany	7,200	26	EM × 2 EA DG × 4 EA GT × 1 EA
	FREMM (Frigate)	Italy	6,700	29	EM × 2 EA DG × 4 EA GT × 1 EA
IPS	DDG-1000 (Destroyer)	USA	14,500	33	EM × 2 EA GTG × 4 EA
	TYPE-45 (Destroyer)	UK	8,500	30	EM × 2 EA DG × 2 EA GTG × 2 EA

Table 10 Propulsion system of naval support vessels [8]

Propulsion system	Name (type)	Operator	Displacement (ton at full load)	Max. speed (knots)	Engines & Generator
CODAD	Berlin (Replenishment oiler)	Germany	20,240	20	2 Shaft DE × 2 EA
	Durance (Replenishment oiler)	France	17,800	19	2 Shaft DE × 2 EA
	Etna (Auxiliary ship)	Italy	13,400	18	2 Shaft DE × 2 EA
	Towada (Support ship)	Japan	15,000	22	2 Shaft DE × 2 EA
	Absalon (Support ship)	Denmark	6,600	24	2 Shaft DE × 2 EA
	Hwa-cheon (Support ship)	Korea	9,110	20	2 Shaft DE × 2 EA
	Ōsumi (Landing ship Tank)	Japan	14,000	22	2 Shaft DE × 2 EA
	HMS Ocean (Landing platform helicopter)	UK	21,500	18	2 Shaft DE × 2 EA
	Galicía class (Landing platform dock)	Spain	13,815	20	2 Shaft DE × 4 EA
	San Antonio class (Amphibious transport dock)	US	25,300	22	2 Shaft DE × 4 EA
IPS	Dokdo class (Amphibious assault ship)	Korea	18,800	23	2 Shaft DE × 4 EA
	Mistral class (Amphibious assault ship)	France	21,300	18.8	A z i m u t h Thruster × 2 EA DG × 4 EA
	Rotterdam (Landing platform dock)	Netherlands	14,000	19	2 Shaft DG × 4 EA EM × 4 EA

3.1.1 추진기관

일반적으로 해군 함정에는 출력이 큰 내연기관을 탑재하며, 위 Table에서 살펴본 것처럼 전투 및 초계 임무를 수행하는 함정에서는 빠른 기동성을 위하여 가스터빈 엔진을 탑재하고 있다.

그러나 군수지원함을 비롯한 상륙함 등의 전투 지원함은 고속 운항의 비중이 상대적으로 작아 가스터빈 엔진 대신 디젤 엔진을 탑재하는 경우가 많으며, 또한 연료 효율에 있어서도 디젤 엔진이 상대적으로 우수하기 때문에 CODAD 추진체계를 주로 탑재하고 있다. 따라서 본 논문에서도 추진기관으로써 디젤 엔진을 선정하였으며 Table 11을 추진기관의 사양으로 설정하였다.

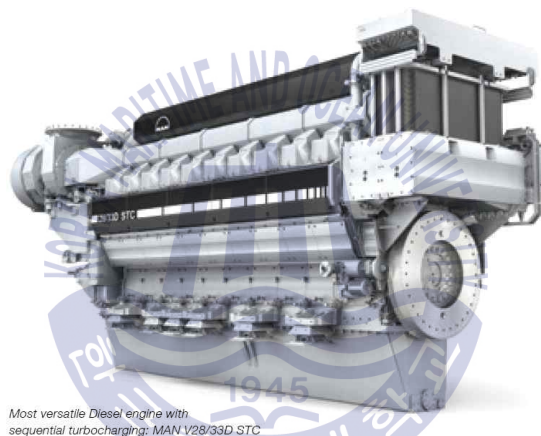


Fig. 13 MAN V28/33D diesel engine [18]

Table 11 Engine specification [18]

Bore	280 mm
Stroke	330 mm
Cylinders	12
Power output	6,000 kW
Output/cylinder	500 kW
Speed	1,032 rpm
Mean effective pressure	28.6 bar
Mean piston speed	11.35 m/s
Specific fuel consumption	194 g/kWh

3.1.2 추진전동기

본 논문에서는 기존의 기계 추진체계에서 디젤 엔진만을 이용하여 운항하는 경우와, 복합 추진체계에서 추진전동기를 탑재하여 디젤 엔진과 함께 운용하는 경우를 비교하였다. IEP와 같이 함정의 추진에 필요한 부하와 함내 무기체계와 거주공간에 필요한 전력을 통합한 경우에는 추진전동기가 모든 속도 구간에서 필요한 함속을 낼 수 있어야 하므로 전동기의 용량이 아주 커지지만, 저속 구간에서만 전동기를 기동한다면 비교적 작은 용량의 전동기를 선정하게 된다.

일반적으로 발전기의 용량은 함정의 운용에 있어 최대 소요 전력량보다 10~20 %의 여유를 주어 설계하게 되는데, 추진전동기의 용량은 최대 소요 전력량과 전력 마진, 함정의 소요마력 등을 고려하여 산정해야 한다. 본 논문에서는 함정의 소요 전력량은 고려하지 않았으며, Table 12를 참고하여 추진전동기의 용량을 설정하였다.

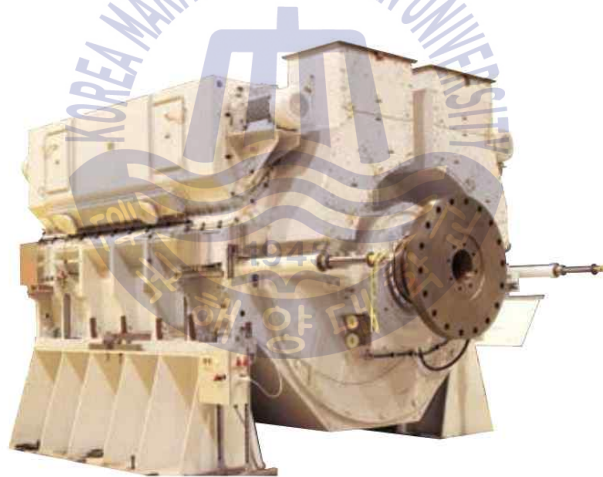


Fig. 14 GE AIM (Advanced Induction Motor) [19]

Table 12 Motor specification [19]

Stator voltage	3,000 ~ 4,000 V
Frequency range	Typically up to 15Hz
Power factor	Typically > 0.8
Power	5,000 ~ 40,000 kW

3.1.3 감속기어 및 클러치

1) 감속기어(reduction gear)

디젤 엔진이나 가스터빈 엔진과 같은 내연기관은 일반적으로 빠른 속도로 회전하기 때문에 이들을 축에 연결하여 원동기(prime mover)로 사용할 때는 회전 속도를 적절하게 줄여야 추진효율이 좋다. 이때 원동기의 축에는 작은 기어를 설치하고, 동력을 전달받는 축에는 큰 기어를 설치하여 맞물리게 하면 두 기어의 기어비(gear ratio)에 따라서 회전 속도를 조절할 수 있다. 이와 같이 기어를 이용하여 회전 속도를 낮추는 것을 ‘감속기어(reduction gear)’라고 하며, 일반적으로 지름이 서로 다른 여러 개의 기어를 조합하여 구성한다.

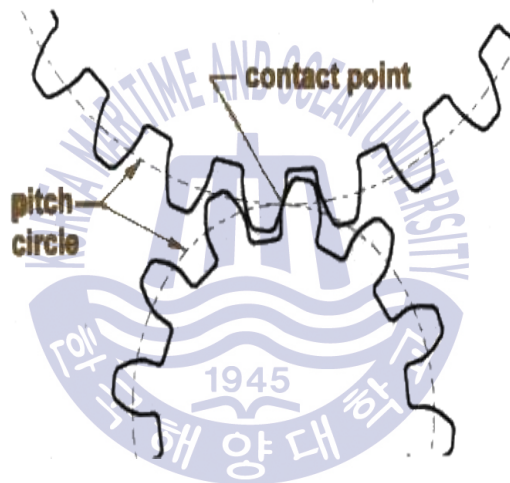


Fig. 15 Pitch circle of meshing gears [8]

맞물려 있는 두 기어에서 동력을 전달하는 기어 A의 반지름을 r_A , 각속도를 ω_A 라고 하고, 동력을 전달받는 기어 B의 반지름을 r_B , 각속도를 ω_B 라고 하면, 피치원(pitch circle)의 접점에서의 속도 v 는 일반적으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[8,20].

$$v = r_A \omega_A = r_B \omega_B \quad (1)$$

여기서 맞물린 두 기어의 관계를 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{r_B}{r_A} = \frac{n_B}{n_A} \quad (2)$$

위 수식에서 n_A 와 n_B 는 각각 기어 A와 B의 이(teeth)의 개수를 나타내고, 한 쌍의 기어가 보이는 기계적 확대율(mechanical advantage)은 식 (3)과 같이 두 기어의 토크 τ 의 비로 나타낼 수 있다[8,20].

$$M.A = \frac{\tau_B}{\tau_A} = \frac{n_B}{n_A} \quad (3)$$

2) 클러치(clutch)

동력원 사이에서 일종의 스위치 같이 동작하는 기계 장치로, 클러치는 동력 전달과 차단이 자유로워 회전력을 전달하는 장치로 사용된다.

클러치는 동력을 전달하는 축과 전달받는 축을 잇는 접촉지점으로 볼 수 있고, 두 축을 이어주거나 떼어내는 동작을 자유롭게 수행할 수 있기 때문에 함정에서는 운항 조건에 따라 서로 다른 추진기관을 운용할 때 감속기어, 축 등으로 동력을 전달하거나 차단하는 목적으로 사용한다[21].

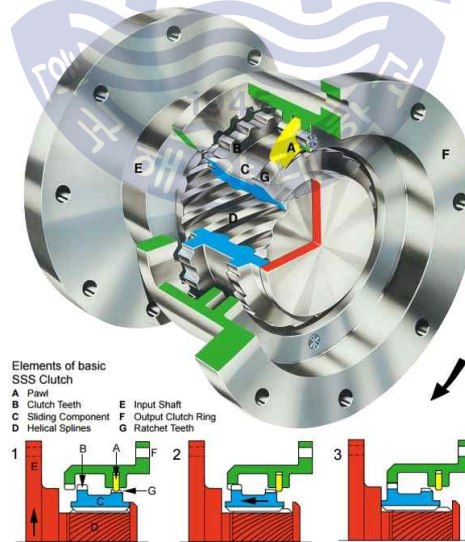


Fig. 16 SSS clutch for marine propulsion [22]

3.1.4 축계 및 프로펠러

축계와 프로펠러는 추진기관으로부터 발생한 동력을 추진력으로 변환하는 역할을 한다. 일반적으로 컨테이너 운반선이나 자동차 운반선과 같은 상선에서는 프로펠러의 날개가 고정되어 있는 ‘고정 피치 프로펠러 (FPP, Fixed Pitch Propeller)’를 설치하고, 해군 함정이나 예인선, 트롤선, 쇄빙선 등과 같이 조종 성능이 중요하거나 역회전이 불가능한 가스터빈 엔진만 탑재된 경우에는 프로펠러 날개의 각도를 바꿀 수 있는 ‘가변 피치 프로펠러 (CPP, Controllable Pitch Propeller)’를 설치한다.



Fig. 17 Fixed pitch propeller



Fig. 18 Controllable pitch propeller

프로펠러가 회전할 때는 이론상으로 이동하는 거리와 실제로 이동한 거리의 차이가 발생하며 이를 슬립 (slip)이라고 한다. 반지름 r 에 대한 프로펠러의 면적을 임의로 설정했을 때, 프로펠러의 슬립은 식 (4)와 같은 관계를 갖는다 [8,23].

$$Slip(\%) = \frac{N_p - V_a}{N_p} \times 100(\%) = 1 - \frac{J}{p} \quad (4)$$

여기서 N_p 는 이론상으로 나아간 거리, V_a 는 실제로 나아간 거리, J 는 전진 계수 (advance coefficient), p 는 피치비 (pitch ratio)를 의미하며, 여기서 J 와 p 는 무차원이다.

전진계수 J 는 프로펠러 회전 속도와 직경, 그리고 선속에 따라 주어지는 값으로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$J = \frac{V_a}{N \times D} \quad (5)$$

또한 피치비 p 는 식 (6)과 같이 프로펠러 피치와 직경의 비이다.

$$p = \frac{P}{D} \quad (6)$$

프로펠러의 추력 T 와 토크 τ 는 모두 작동 유체의 특성과 함께 프로펠러 직경 D , 회전수 N , 그리고 전진 속도 V_a 에 대한 함수이다. 프로펠러의 추력 T 는 식 (7)로 표현할 수 있다[8,23].

$$T = \rho V^2 D^2 [f_1(\frac{ND}{V_a}), f_2(\frac{v}{V_a D}), f_3(\frac{gD}{V_a^2})] \quad (7)$$

f_1 은 전진 계수에 대한 함수, f_2 는 Reynolds 수에 대한 함수, f_3 은 Froude 수에 대한 함수이며, 일반적인 조건에서 f_2 와 f_3 은 모두 f_1 에 비하여 작다. 따라서 이를 다음과 식 (8)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$T = \rho V_a^2 D^2 \times f_r(\frac{ND}{V_a}) \quad (8)$$

프로펠러 추력 T 처럼 프로펠러의 토크 τ 도 식 (9)와 같이 간략히 나타낼 수 있다[8,23].

$$\tau = \rho V_a D^3 \times f_q(\frac{ND}{V_a}) \quad (9)$$

위 두 수식에서 ρ 는 작동 유체의 밀도를 의미한다. 해수의 밀도는 염분이 증가함에 따라 커지며, 일반적으로 1,024~1,030 kg/m³의 범위에 속한다.

3.2 마력과 효율의 종류 및 계산

일반적으로 추진기관으로부터 발생한 동력을 표현할 때는 ‘마력(HP, Horse Power)’ 단위를 사용한다. 함정 추진기관에서 발생한 동력은 기계적 손실이 발

생하므로 측정하는 위치에 따라서 차이가 생기며, 추진기관 및 추진기에 따라 동력을 계산하는 방법이 다음과 같이 달라진다.

3.2.1 추진기관

1) 지시마력 (IHP, Indicated Horse Power)

기관의 실린더 내부에서 발생하는 힘을 가리킨다. 지압선도의 면적을 계산하여 구할 수 있으며 도시마력이라고도 한다. 지시마력은 식 (10)과 같이 나타낸다[24].

$$IHP = \frac{P_e \times L_p \times A \times N}{75} [PS] \quad (10)$$

(P_e :평균유효압력 [Pa], L_p :행정 [m], A :실린더 단면적 [m^2], N :분당회전수 [rpm])

2) 제동마력 (BHP, Brake Horse Power)

크랭크축 끝단에서 측정한 마력으로, 지시마력에서 피스톤, 베어링 등의 각 부 손실을 제외한 기관 출력단의 마력을 의미하며 식 (11)과 같이 나타낸다.

$$BHP [PS] = IHP - loss = IHP \cdot \eta_m \quad (11)$$

여기서 η_m 는 기계효율이고, 식 (12)와 같이 제동마력과 지시마력의 비이다.

$$\eta_m = \frac{BHP}{IHP} \quad (12)$$

3) 전달마력 (DHP, Delivered Horse Power)

제동마력이 프로펠러까지 전달되기 전에 메인 베어링, 선미관 등에서 발생하는 손실을 제외한 것으로 이를 전달마력이라고 한다. 실질적으로 프로펠러에 전달되는 힘으로 식 (13)과 같이 표현할 수 있다[24].

$$DHP [PS] = BHP - loss = BHP \cdot \eta_d \quad (13)$$

여기서 η_d 는 전달효율이고, 식 (14)와 같이 전달마력과 제동마력의 비이다.

$$\eta_d = \frac{DHP}{BHP} \quad (14)$$

3.2.2 프로펠러

1) 추진마력 (THP, Thrust Horse Power)

프로펠러가 회전하여 추력 T 에 의하여 함정이 속력 V_a 로 전진한다면, 이때 프로펠러에서 발생한 힘을 추진마력이라고 한다. 식 (15)에서 분모에 나누어진 수는 마력의 단위로 표현하기 위하여 쓰였다[24].

$$THP = \frac{T \times V_a}{75} [PS] \quad (15)$$

2) 유효마력 (EHP, Effective Horse Power)

함정이 어떤 속력 V_a 로 전진하고자 할 때 필요한 동력으로 식 (16)과 같이 계산할 수 있다. R 은 선체저항이다.

$$EHP = \frac{R \times V_a}{75} [PS] \quad (16)$$

3) 추진효율 (P.E, Propulsive Efficiency)

추진효율은 추진계수 (P.C, Propulsive Coefficient)라고도 하고, 프로펠러와 선체의 관계를 나타내며, 선체저항이 R 이고 속력 V_a 로 전진할 때의 마력 P 를 이용하여 식 (17)과 같이 계산할 수 있으며, 또한 추진효율은 배를 추진하는 유효마력과 추진기관에 의하여 발생한 제동마력(정미마력)의 비라고 할 수 있다 [24].

$$P.E = \frac{EHP}{THP} \times \frac{THP}{DHP} \times \frac{DHP}{BHP} = \frac{EHP}{BHP} \quad (17)$$

3.2.3 소요마력 산출 방법

선박이나 함정이 원하는 속력으로 운항하기 위해서는 추진기관에서부터 프로펠러까지 동력이 전달되는 과정에서 발생하는 기계적 손실뿐만 아니라 바람과

물에서 기인하는 선체저항 등을 함께 고려해야 한다. 이때 주어진 속력으로 운항하기 위하여 필요한 추진기관의 마력을 산정할 때 다음과 같은 방법을 사용한다.

1) 모형 수조시험에 의한 방법

일정한 축척의 모형선을 이용하여 수조 시험을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 실제 마력을 추정하는 방법이다. 모형선의 수조 시험에서 도출한 총 저항을 실선의 총 저항으로 환산하여 유효마력을 산출한다[25].

2) 비교법칙의 응용에 의한 방법

실선과 상사선(相似船)의 실제 지시마력을 각각 IHP_a , IHP_b 라고 가정하면, 비교법칙에 의하여 다음 식 (18)이 성립한다.

$$\frac{IHP_a}{IHP_b} = \left(\frac{D_a}{D_b}\right)^{\frac{2}{3}} \times \left(\frac{V_a}{V_b}\right)^3 \quad (18)$$

(D :배수량 [ton], V :속력 [m/s])

여기서 상사선의 마력 IHP_b , 배수량 D_b , 속력 V_b 를 대입하고 실선의 배수량 D_a , 속력 V_a 를 알면 IHP_a 를 비교적 쉽게 구할 수 있다[25].

3) 해군 계수 (admiralty coefficient)에 의한 방법

함정이 어떤 속력으로 운항하기 위하여 필요한 추진기관의 동력은 배수량 D 의 $2/3$ 제곱과 함정의 속력 V_s 의 3 제곱에 비례하는 것으로 가정하고, 이때의 비례 상수를 해군 계수 C_{adm} 로 정의하며, 다음 식 (19)와 같이 계산한다[24,25].

$$IHP = D^{\frac{2}{3}} \times \frac{V_s^3}{C_{adm}} \quad (19)$$

본 논문에서는 AOE-59 화천함의 최대 추진 마력과 배수량, 그리고 최고 속력을 바탕으로 C_{adm} 을 계산하였고, C_{adm} 을 바탕으로 가상 함정의 최대 소요 마력을 계산하였다.

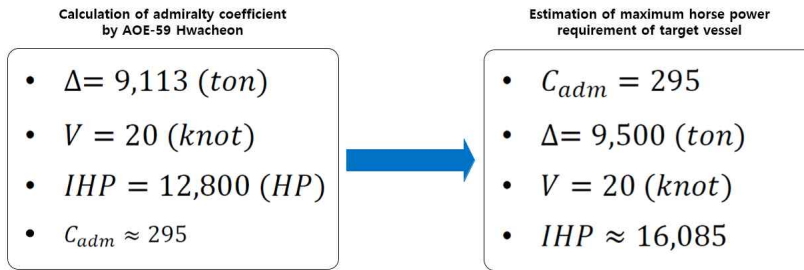


Fig. 19 Calculation of maximum horsepower requirements

C_{adm} 이 295인 것은 일반적으로 해군 함정이 약 150의 C_{adm} 을 갖는 점에 비하면 다소 큰 값이지만, 군수지원함은 해상 기동 작전 중에 RAS (Replenishment At Sea) 및 FAS (Fueling At Sea) 등의 해상 군수지원을 수행하기 때문에 함정의 형상이 전투함정과는 다소 차이가 있을 것으로 판단하였고, 또한 화객선과 대형 화물선의 해군 계수 C_{adm} 이 약 230~270의 값을 갖는 점에 착안하여 계산 결과에 따라 해군 계수 C_{adm} 을 295로 설정하였다.



Fig. 20 The replenishment oiler HMAS Sirius [8]

Fig. 20은 오스트레일리아 해군에서 운용 중인 군수지원함 HMAS Sirius (O266)가 미 해군의 강습상륙함 USS Juneau (LPD-10)에 해상 군수지원을 수행하고 있는 모습이다. 사진을 통하여 두 함정의 형상에 차이가 있는 것을 확인할 수 있다.

3.3 평가 인자의 정량화 및 비교 방법

일반적으로 상선에서는 선박을 건조하는 데서 오는 비용부터 화물 운반 시에 발생하는 연료, 유지 및 보수에 필요한 기부속 비용과 인건비 등의 경제성이 중요한 평가 인자가 될 것이다. 그러나 해군 함정에서는 그 특성상 다음과 같은 평가 인자들이 있다[26].

3.3.1 함정 평가 인자

1) 전투능력

전투능력은 함정이 갖추어야 할 능력 중 가장 우선시되어야 할 부분일 것이다. 일반적으로 함정에 탑재되는 함포, 미사일, 레이더 등의 무기체계에 따라서 결정되는 탐지 능력, 화력의 사정거리 등을 예로 들 수 있다. 함포나 미사일의 적재 수량 또한 전투능력에 반영되는데, 여기에는 함정의 중량과 연결되기 때문에 트레이드오프(trade off)가 발생한다.

함정이 작전 해역까지 이동하는 데 걸리는 시간이나 작전을 오래 수행할 수 있는 능력 등, 추진체계에 따라 결정되는 기동능력과 조종 성능, 작전 지속 시간 및 최대 작전 범위도 전투능력으로 분류되는데, 이런 경우는 해상 보급 등의 여부에 따라 달라지므로 군수지원함의 역할이 크게 작용하는 부분이라고 할 수 있다.

2) 운용성

군사 용어에서 ‘운용(運用)’의 사전적인 의미는, 어떤 임무나 작전을 수행함에 있어 부대 및 장비를 그 기능과 성능에 따라 적절하게 사용하는 것이다. 따라서 해군 함정이 가지는 목적 및 주요 임무에 따라 탑재된 추진체계에서부터 무기체계, 거주를 위한 환경 및 복지 시설, 운용에 필요한 인력, 유지·보수에 필요한 비용 및 주기, 신뢰성, 운용상의 배치성 등이 포함될 것이다. 또한 함대와 같이 여러 함정이 함께 기동하는 경우에 있어 종류가 다른 함정들 사이의 상호 운용성도 고려될 것으로 판단된다.

3) 경제성

함정 운용에 있어서 경제성은 장비 구입비, 주요 무기 및 추진체계 탑재 비용을 비롯하여 함정의 퇴역 전까지 지속적으로 발생하는 인건비, 유지·보수에 따른 비용, 각 종 소모품 및 기부속, 그리고 연료유 등에 따라 달라진다. 따라서 이러한 요소들에 한정된 재화를 얼마나 적절하게 분배하고 투입하는지가 중요하다.

일반 상선에서는 적은 연료유를 싣고 얼마나 멀리까지 화물을 운송할 수 있는지가 화물의 적재량만큼이나 중요하게 여겨진다. 군함의 경우에도 먼 거리의 해역까지 작전을 수행할 수 있다면 그만큼 작전 반경 및 최대 항속 거리가 확장되는 것으로 볼 수 있고, 이러한 함정은 우수한 경제성을 갖추었다고 볼 수 있을 것이다. 또한 우수한 연료 효율이 작전 수행 능력과도 연관된다. 따라서 연료 효율의 개선은 경제성을 높이는 절약적인 차원에서만 의미가 있는 것이 아니라, 함정의 전투능력을 향상시킬 수 있는 부분으로 작용한다.

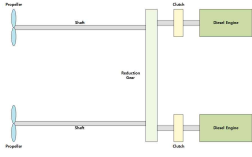
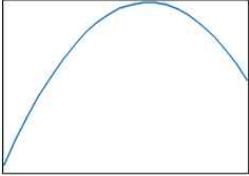
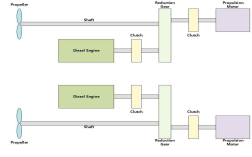
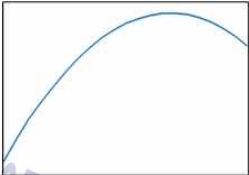
3.3.2 정량화 및 비교 방법

본 논문에서는 추진체계별 연료 소비량을 비교하기 위하여 디젤 엔진과 추진전동기를 선정하였다. 또한 실제 전투함정의 운항 프로파일을 바탕으로 가상함정의 운항 프로파일을 설정하여 각 추진체계의 연간 연료 소비량을 비교하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 운항 시 연료 소비량을 줄임으로써 작전 중 해상 보급의 횟수를 줄이는 것이 함정의 작전 수행 능력과 운항 효율을 향상시켜 전투 능력에 영향을 줄 수 있기 때문에 우선적인 비교 인자로 선정하였다.

시뮬레이션은 NI(National Instrument)사의 LabVIEW를 이용하여 수행하였으며, 이는 해상에서 함정의 운항에 따라 추진체계에서 발생하는 연료 소비량을 고려한 것이다. Table 13은 추진체계의 구성과 운항 프로파일을 나타내고 있다. CODAD 추진체계는 디젤 엔진 2대, CODLOD 및 CODLAD 추진체계는 추진전동기 2대와 디젤 엔진 2대로 구성하였다.

운항 프로파일은 단기(short-term) 및 장기(long-term) 작전의 두 가지로 나누어 각 추진체계에 동일하게 적용하여 연료 소비량 결과를 산출하였다. 함정의 운항 프로파일을 설정하는 과정은 4장에서 설명하였다.

Table 13 Method of comparison and analysis of simulation

Propulsion engine	Propulsion system	Operating profile	Fuel Consumption
$DE \times 2$	 CODAD system	 Short-term duty	Comparison & Analysis
$PM \times 2$ $DE \times 2$	 CODLOD / CODLAD system	 Long-term duty	




제 4 장 가상함정 및 시뮬레이션 설정

4.1 가상함정 설정

본 논문에서는 대한민국 해군에서 운용하고 있는 실제 함정을 바탕으로 시뮬레이션의 가상함정을 설정하였다. Table 14는 대한민국 해군에서 운용하고 있는 AOE-59 천지함의 제원을 보여주고 있다.

Table 14 Specification of Hwacheon(AOE-59) [9]

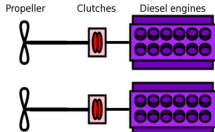
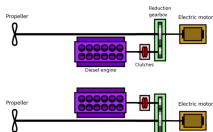
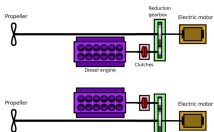
Figure			
Name		Hwacheon (AOE-59)	
Type		Chunji-class fast combat support ship	
Commissioned		in 1998	
Displacement (ton)	Full	9,113	
	Light	4,200	
Load capacity (ton)	Oil	4,200	
	etc.	450	
Length (m)		136	
Beam (m)		17.8	
Draught (m)		6.5	
Propulsion	Engine	Two Diesel engines (CODAD system)	
	Power	12,800 HP (≒ 9,548 kW)	
Speed (knot)	Maximum	20	
	Cruising	15	
Max. cruising range		8,300 km (≒ 4,481 NM)	

일반적으로 연중 악조건에 속하는 겨울철을 기준으로 선박이나 함정을 설계하기 때문에 Table 14를 통하여 확인할 수 있는 제원은 겨울철을 기준으로 설계된 것으로 간주하였고, 본 논문의 가상함정도 여름철을 기준으로 설계하였다. 또한 Table 14의 제원으로부터 가상함정을 설정할 때 함정의 배수량, 추진체계와 최대 출력, 그리고 최고 속력을 참고하였다.

Table 15는 가상함정의 제원을 간략하게 나타내고 있으며, 연간 연료 소비량의 측면에서 기계 및 복합 추진체계가 보이는 차이점을 확인하기 위하여 동일한 제원에 서로 다른 추진체계를 적용하였다.

CODAD 추진체계는 6,000 kW 디젤 엔진 2대, CODLOD 및 CODLAD 추진체계는 1,500 kW 전동기 2대와 6,000 kW 디젤 엔진 2대를 탑재한 것으로 설정하였다. 함정의 만재배수량은 9,500 ton이며, 최고 속력과 순항 속력은 각각 20 knot, 15 knot이다.

Table 15 Specification of virtual vessel

Classification		Virtual vessl		
Propulsion	Type	CODAD system	CODLOD system	CODLAD system
	Power	DE × 2 EA 6,000 kW each	PM × 2 EA 1,500 kW each at lower speed	PM × 2 EA 1,500 kW each at lower speed
			DE × 2 EA 6,000 kW each at higher speed	DE × 2 EA 6,000 kW each at higher speed
Configuration				
Displacement at full load (ton)		9,500		
Speed (knot)	Maximum	20		
	Cruising	15		

4.2 운항 프로파일 추정

기관의 동력에 따른 연료 소비량을 산출하기 위하여 실제 함정의 추진체계 측면에서는 함정의 운항 속력보다는 기관의 출력이 더 큰 의미를 가지겠지만, 운항 속력에 따른 기관의 출력을 매순간 정밀하게 산출해내는 데는 어려움이 따른다. 이에 본 논문에서는 운항 프로파일에 따른 속력 값을 순차적으로 입력 함으로써 그에 따른 연료 소비량을 구하였으며, 가상함정의 운항 프로파일은 전투함정의 운항 프로파일을 참조하여 설정하였다.

또한 작전 및 임무 수행 시의 해상 조건 등 많은 변수가 존재하기 때문에 실제 해군에서 운용하는 함정의 운항 속력과 시간 비율을 바탕으로 군수지원함의 특성을 바탕으로 연간 운항 프로파일을 추정하였다.

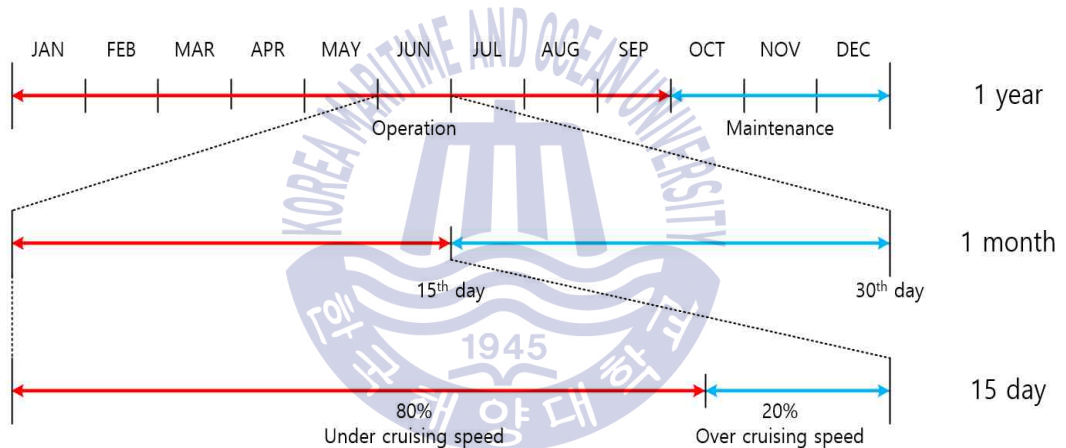


Fig. 21 Operating profile of naval vessel [26]

Fig. 21은 전투함정의 연중 운항 기간을 나타내고 있다. 그림에 따르면, 일반적으로 함정은 연간 약 9개월의 운용 기간을 가지고, 약 3개월의 정비 기간을 가진다. 운용 기간 중 절반은 항내에서 대기하고 나머지 절반은 해상에서 기동한다. 해상 기동 시에는 운항 시간 중 약 80%를 순항 속력 이하로 운용하고, 약 20%를 순항 속력 이상으로 운용한다.

하지만 본 운항 프로파일은 전투함정에 대하여 추정한 것으로 군수지원함의 운항 성격과 다른 부분이 많다. 따라서 군수지원함의 연간 운항 프로파일을

Fig. 22와 같이 설정하였다.

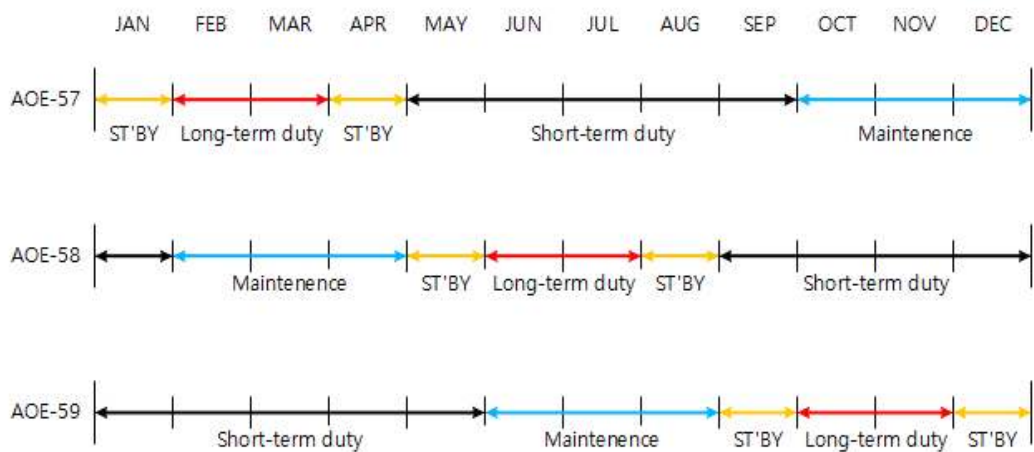


Fig. 22 Set operating profile of virtual vessel

연간 9 개월의 운용 기간과 3 개월의 정비 기간은 그대로 유지하되, 대한민국 해군에서 운용 중인 3 척의 군수 지원함이 1 년 내에 교대로 장기간의 작전을 수행하는 상황으로 설정하였다. 따라서 1 년에 3 척이 교대로 돌아가기 위하여 총 4 개월의 소요 기간을 설정하였다. 그 중 앞의 1 개월은 부식 및 탄약 등의 군수 물품을 선적하기 위하여 항내에서 대기하는 것으로, 또 뒤의 1 개월은 복귀 후 정리 및 정비를 위하여 항내에서 대기하는 것으로 보았다.

남은 운용 기간 5 개월 동안은 연안 항해 및 짧은 기간의 작전만을 수행하는 것으로 가정하였고, Fig. 21과 같이 매달 보름 동안 운용하고 남은 보름은 항내 대기 기간으로 보아 1 년 동안의 운항 프로파일을 설정하였다.

운항 속력에 대하여는 전투함이 전체 운항 시간 중 약 80 %를 순항 속력 이하로 기동하고, 나머지 시간을 그 이상의 속력으로 기동하는 것을 바탕으로 설정하였다. Table 16은 장기간의 작전과 단기간의 작전에 있어서 운항 속력과 시간 비율을 나타낸다.

Table 16 Operating profile of combat support ship

Speed [knot]	Time [%]	
0~6	5	5
6~10	35	25
10~16	40	50
16~18	15	15
18~20	5	5
Classification	Long-term duty 2 months = 1,440 hours = 86,400 minutes	Short-term duty 15 days = 360 hours = 21,600 minutes

4.3 운항 모드 설정

본 논문 대상 함정의 운항 모드를 나누기 위하여 미 해군의 DDG-51 알레이 버크급 구축함의 운항 모드를 참고하였다.

Fig. 23은 가스터빈 엔진이 탑재된 DDG-51 구축함의 상황별 운항 모드를 나타내고 있고, Fig. 24는 HED가 설치된 DDG-51 구축함의 상황별 운항 모드를 나타내고 있다.

자료에 의하면 항내 (inport), 묘박지 (anchor), 평시 (cond III and IV), 전시 (cond I) 등의 환경에 따라 각각 다른 운항 모드가 적용되는 것을 알 수 있다. 또한 HED가 설치된 경우, 평시에 약 12 knot까지는 전기 파워 스티어링 (electrically powered steering) 모드로 운항됨을 알 수 있다.

DDG-51 구축함은 평시 운항 모드에서 추진기관의 운전 대수에 따라 경제모드 (trail shaft), 순항모드 (split plant) 및 전속모드 (full power)로 나눌 수 있다. 예를 들어 4 대의 추진기관으로 탑재되어 있는 전투함정을 기준으로 경제모드는 추진기관 1 대를, 순항모드는 추진기관 2 대를, 전속모드는 추진기관 4 대를 운전한다. 즉 함정은 상황에 따라 속력 구간별로 각각 다른 운항 모드가 적용된다.

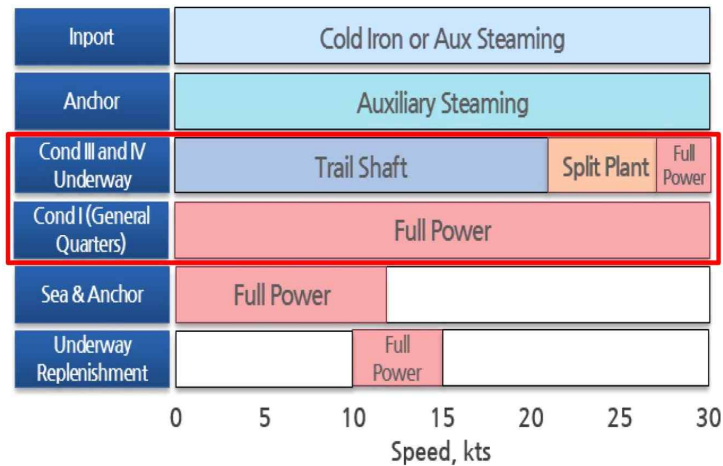


Fig. 23 Operation mode of DDG-51 (not HED) [27]

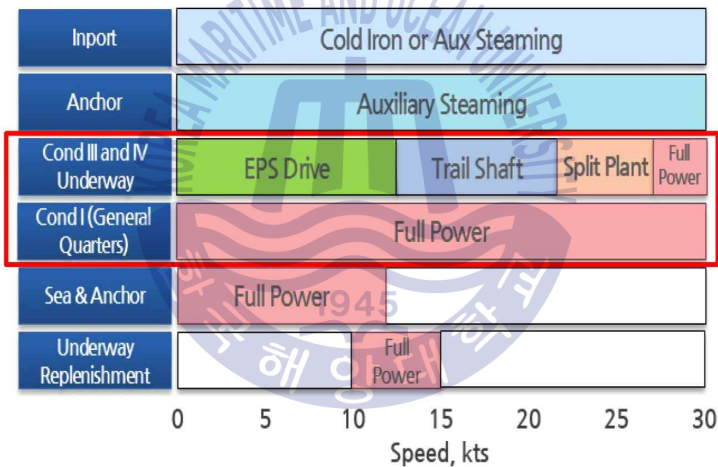


Fig. 24 Operation mode of DDG-51 (HED) [27]

본 논문에서는 기계 추진체계인 CODAD의 경우에 전시 (cond I) 상황과 같이 모든 속력 구간에서 2 대의 디젤 엔진을 모두 운전하는 것으로 설정하였고, 복합 추진체계인 CODLOD 및 CODLAD의 경우에 추진전동기와 디젤 엔진의 운전 방식에 따라 운항 모드를 나누었다. Table 17, 18은 미 해군의 전투함정 및 본 논문의 대상 함정의 운항 모드를 나타내고 있다.

Table 17 Operation mode of DDG-51 and CG-47 class

Operating mode	Description
Trail shaft mode	1 Propulsion engine on
Split plant mode (Two engine)	2 Propulsion engines on
Full power mode (Four engine)	4 Propulsion engines on

Table 18 Operation mode of virtual vessel

Propulsion system	Operating mode	Propulsion engine
CODAD	Full power mode	DE × 2
CODLOD	Low speed mode	PM × 2
	Cruising mode	DE × 1
	High speed mode	DE × 2
CODLAD	Low speed mode	PM × 2
	Cruising mode	DE × 1
	High speed mode	DE × 2
	Full power mode	PM × 2 DE × 2

운항 모드가 하나뿐인 CODAD 추진체계에서는 속력에 따른 디젤 엔진의 운전 구간을 나눌 필요가 없지만, 속력 구간에 따라 추진기관이 바뀔 수 있는 CODLOD 및 CODLAD 추진체계에서는 추진전동기와 디젤 엔진의 운전 구간을 나누어야 한다.

추진전동기의 용량과 운항 구간에 있어서는 군수지원함의 발전기 용량이 크지 않기 때문에 최고 속력의 60 %인 약 12 knot까지만 추진전동기를 이용하는 것으로 설정하였다. 그 이유는 군수지원함이 해상 보급 등의 작전을 수행할 때 순항 속력인 15 knot보다 일정 수준 느린 속력으로 운항할 것으로 추정하였기 때문이다. 이때 필요한 동력은 추진기관의 최대 출력의 약 21.6 %인 2,600 kW 정도가 되며, 본 논문에서는 마진을 두기 위하여 개략적으로 3,000 kW로 전동

기의 용량을 설정하였다.

또한 1 대의 디젤 엔진의 최대 출력을 전체 기관 출력의 50 %로 보았을 때, 1 대의 디젤 엔진으로 최고 속력의 약 79.3 %까지 운항이 가능하게 된다. Fig. 25 는 기관 출력 대 운항 속력 그래프와 추진체계 별 운항 모드를 나타내고 있다.

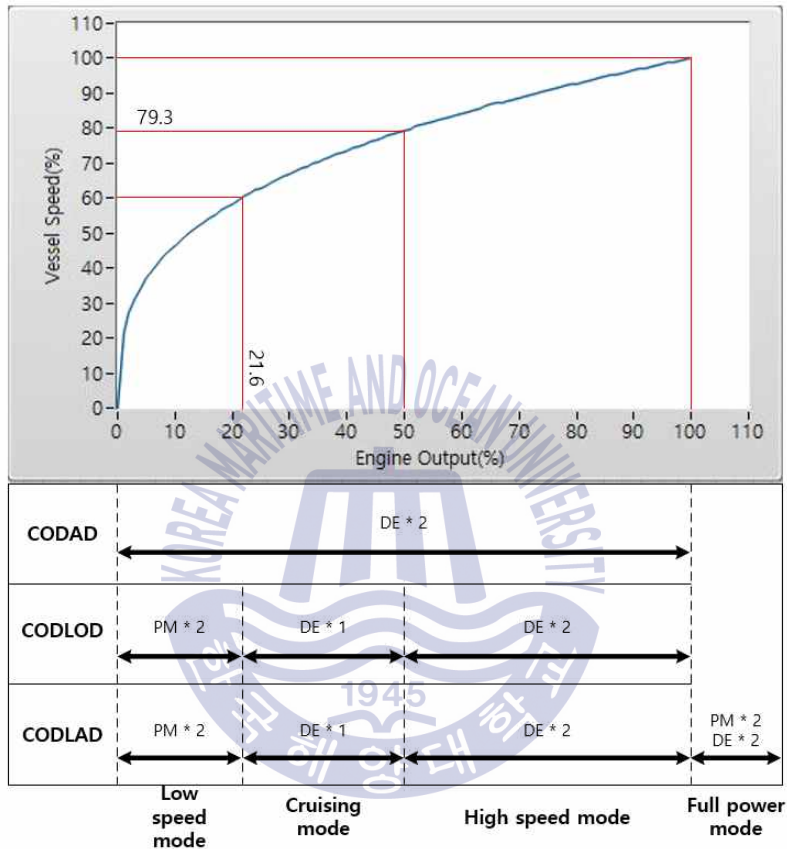


Fig. 25 Operation mode depending on vessel speed

4.4 연료 소비량 산출 방법

연료 소비량은 문자 그대로 함정의 운항 중 소비되는 연료의 양을 의미하며, 함정의 마찰저항, 속력, 배수량 등을 바탕으로 수식을 유도하여 산출하였다.

일반적으로 선박이나 함정에서는 운항 속력이 빠를수록 전 저항 R 에서 마찰 저항 R_f 가 차지하는 비율이 지배적이다. 따라서 Froude의 마찰저항식을 이용하

여 식 (20), (21)과 같은 관계를 유도할 수 있다[24].

$$R_f = f \times S \times V_a^n [lbs] \quad (20)$$

$$\therefore R_f \propto S V_a^2 \quad (21)$$

(f :실험에 의한 계수, S :침수 표면적[ft²], V_a :속력[knot])

또한 상사선에 있어서 배수량을 D [ton], 전장을 L [m]이라고 하면, 수식 (22), (23)과 같은 관계가 성립한다.

$$D \propto L^3, S \propto L^2 \quad (22)$$

$$\therefore S \propto D^{\frac{2}{3}} \quad (23)$$

여기서 저항의 관계식에 침수면적 S 를 대입하면 식 (24), (25)와 같이 유도할 수 있다.

$$R_f \propto D^{\frac{2}{3}} V^2 \quad (24)$$

$$\therefore R_f V \propto D^{\frac{2}{3}} V^3 \quad (25)$$

지시마력 IHP 는 마찰저항과 속력의 곱에 비례하므로, 식 (26), (27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$IHP \propto R_f V \propto D^{\frac{2}{3}} V^3 \quad (26)$$

$$\therefore IHP \propto D^{\frac{2}{3}} V^3 \quad (27)$$

위 관계를 바탕으로 배수량을 고정시키면 지시마력 IHP 는 함정의 속력 V 의 3 제곱에 비례함을 알 수 있다. Fig. 26은 운항 속력의 3 제곱에 비례하여 기관의 출력이 증가해야 함을 의미하는 Froude의 프로펠러 법칙을 나타내고 있다.

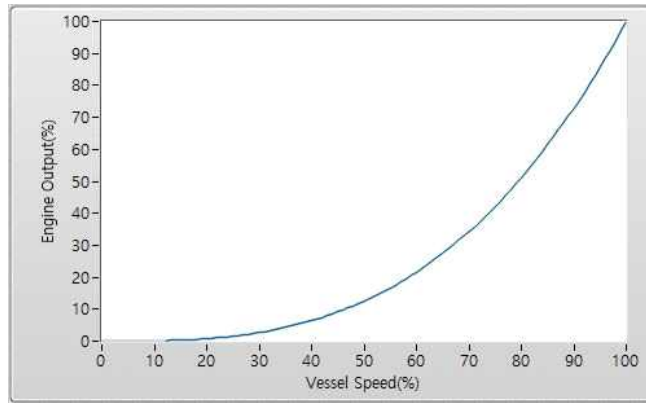


Fig. 26 Froude propeller's law

연료 소비량은 기관의 출력에 비례하므로 특정 추진기관 모델의 연료 소비율 (SFC, Specific Fuel Consumption)을 알면 개략적인 연료 소비량을 계산할 수 있다. 식 (28)을 통하여 특정 운항 속력에서의 연료 소비량을 알 수 있고, 그 결과를 모두 더하면 총 연료 소비량을 알 수 있다.

$$\text{Fuel Consumption } X_n [g] = \text{SFC}[g/kW \cdot h] \times P[kW] \times H[h] \quad (28)$$

$$\text{Total Fuel Consumption} = \sum_{i=1}^n X_i = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (29)$$

본 논문에서는 소요마력 산출 결과에 따라 근사한 출력을 가지는 MAN V28 / 33D 모델의 연료 소비율 곡선을 NI (National Instrument)사의 LabVIEW를 이용하여 보간(fitting)하였다. Fig.27은 MAN V28/33D 모델의 연료 소비율 곡선과 LabVIEW를 이용하여 보간한 결과를 보여주고 있다.

보간의 결과로 얻은 곡선은 식 (30)과 같다. 수식에서 독립변수 x 는 추진기관의 부하율(%)을 의미하고, 종속변수 y 는 단위시간 당, 단위출력 당 연료 소비율을 의미한다.

$$y = 322.894 - 3.14841x + 0.01826x^2 \quad (30)$$

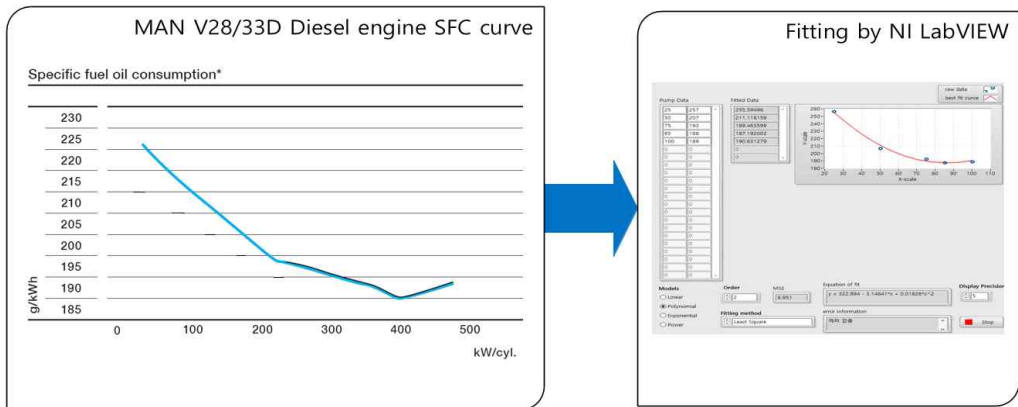


Fig. 27 Fitting on SFC curve [18]

Fig. 28은 LabVIEW를 이용하여 보간한 수식을 그래프로 나타낸 것이다.

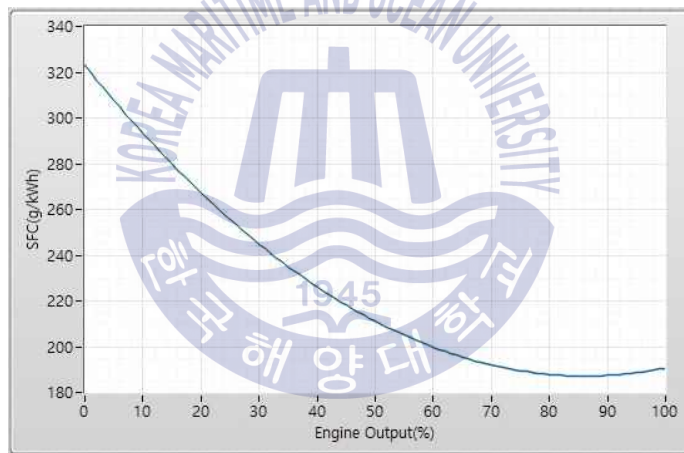


Fig. 28 SFC curve for simulation

제 5 장 시뮬레이션 및 결과 분석

5.1 CODAD 추진체계

CODAD 추진체계에서는 ‘4.2 운항 모드 설정’ 에서 언급한 것처럼 모든 구간에서 디젤 엔진 2 대를 운전하는 것으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 29는 CODAD 추진체계를 탑재한 가상함정의 연간 연료 소비량을 산출하기 위한 LabVIEW 다이어그램의 순서를 간략하게 나타내고 있다. 기관의 부하율에 따른 연료 소비율 곡선을 산출하는 부분, 단기 및 장기 작전 시의 운항 프로파일에 따른 속도 구간 비율을 입력하는 부분, 연간 연료 소비량을 합산하는 부분, 그리고 결과를 시각화 하여 그래프로 나타내는 부분 등으로 구성되어 있다.

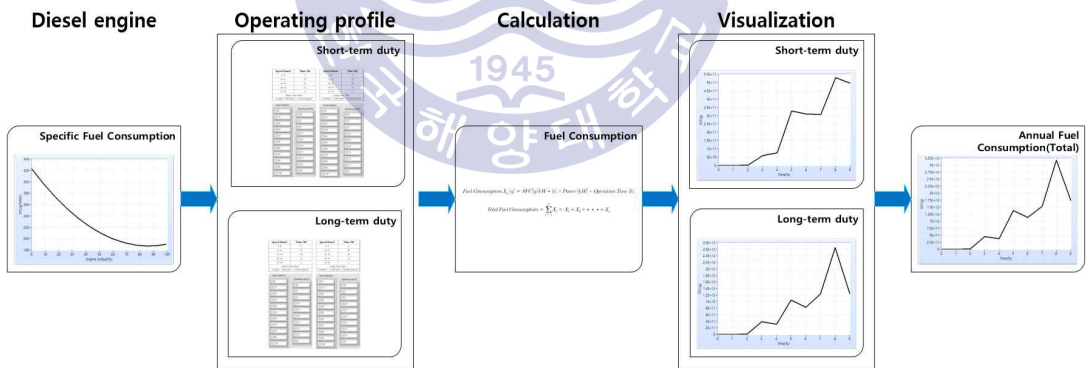


Fig. 29 Flow of simulation for CODAD

가상함정의 배수량은 9,500 ton으로 고정하여 시뮬레이션을 진행하였고 연료 소비량 계산 결과를 저장하여 각 추진체계의 연간 연료 소비량을 비교 및 분석하였다. Fig. 30은 CODAD 추진체계의 시뮬레이션을 위한 LabVIEW의 다이어그램을 나타내고 있다.

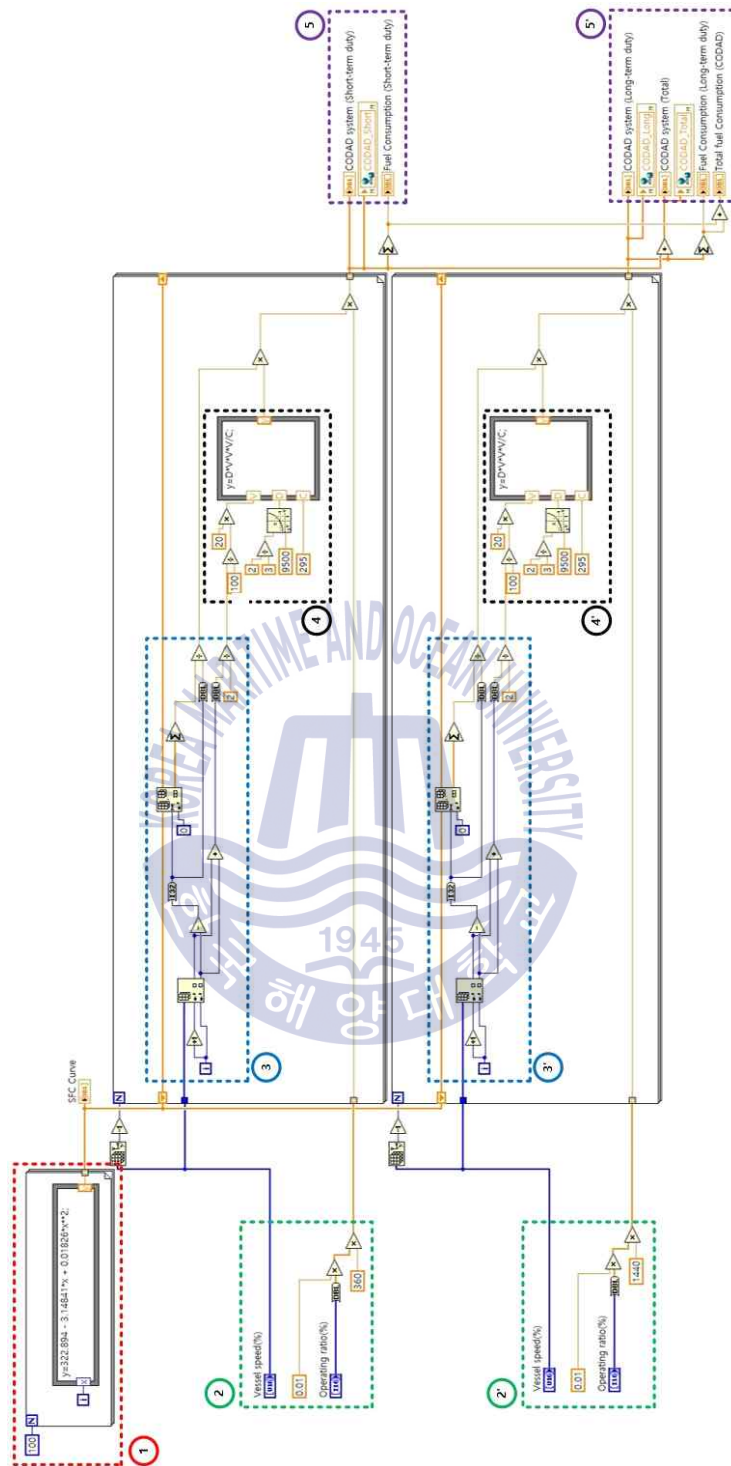


Fig. 30 LabVIEW diagram of simulation for CODAD

다이어그램의 각 부분은 Fig. 31부터 Fig. 37과 같이 진행되며 단기 작전의 경우에 따른 시뮬레이션 방법에 대하여 아래와 같이 나타내었다.



Engine Output (%)	SFC (g/kWh)
25	257
50	207
75	192
85	188
100	189

Fig. 33은 Table 17에서 추정하였던 단기 작전의 총 운항 시간, 속력 구간 및 해당 구간에서의 운항 비율을 입력하는 부분이다. 단기 작전은 15일(360시간), 장기 작전은 60일(1,440시간)으로 설정하였다.

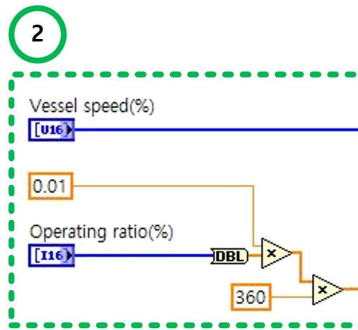


Fig. 33 Operating profile of short-term duty

Fig. 34는 식 (28)에서 언급하였던 $SFC[g/kW \cdot h]$ 를 구하는 부분이다. 연료 소비율 곡선 및 함정의 속도 구간을 배열 형태의 데이터로 입력하며 모든 속도 구간에서의 연료 소비율을 합산한다.

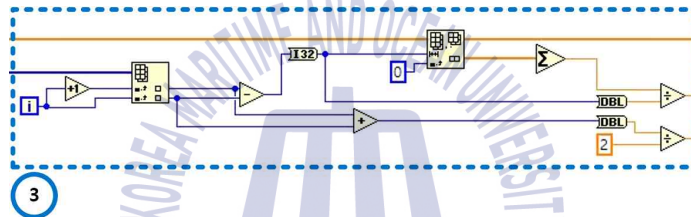


Fig. 34 Specific fuel consumption of each speed section

속력은 Fig. 35와 같이 백분율로 환산하여 10%마다 구간의 평균을 구하였고 운항 프로파일에 따라 각 속도 구간에서의 운항 시간을 계산하였다.

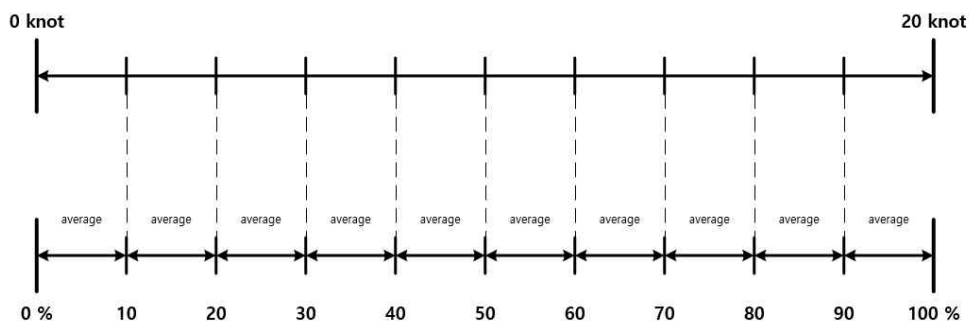


Fig. 35 Averaged speed section by percentage

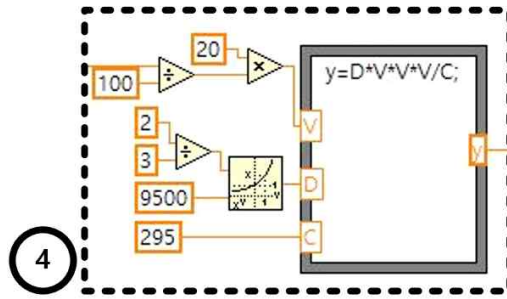


Fig. 36 Calculation of horsepower requirements

Fig. 36은 식 (19)에 따라서 함정의 속력에 따른 소요마력을 해군 계수에 의하여 계산하는 부분이다. 운항 프로파일에 따른 함속을 소요마력으로 환산한 후에 부하율을 곱하여 식 (28)의 출력 $P[kW]$ 를 계산한다. 이때 가상함정의 배수량은 9,500 ton으로 고정하였다.

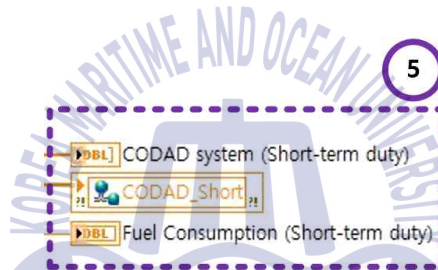


Fig. 37 Results of simulation for CODAD

Fig. 37은 CODAD 추진체계의 단기 작전 시 연료 소비량을 출력하는 부분이며 추후 각 추진체계 별 연료 소비량의 차이를 비교할 수 있도록 구현하였다.

5.2 CODLOD 추진체계

복합 추진체계인 CODLOD는 기계 추진체계인 CODAD와 달리 추진전동기가 추가되기 때문에 추진전동기 사용에 따른 전력 변환 효율을 고려해야 한다. Fig. 38은 발전기에서 생산된 전력이 주 배전반, 변압기, 컨버터 등의 전력 변환 과정을 거친 후에 최종적으로 전동기에 공급되기까지의 전력 손실을 나타내고 있다[11].

Fig. 38과 같이 원동기 운전부터 전동기 기동에 따른 축동력(shaft power, P_s)이 발생하기까지 약 8.7~9.7%의 손실이 발생한다. 그 결과 전력 변환 효율은

91.3 ~ 92.3 %가 된다. 본 논문에서는 추진전동기 한 대의 용량을 1,500 kW, 전력 변환 효율을 90 %로 설정하였다. 가상함정의 전력 소모량(Ship electric load)은 일정하다고 가정하였다. 또한 추진전동기에 의한 연료 소비량은 디젤 엔진의 부하율이 80 %일 때의 연료 소비율을 적용하여 계산하였다.

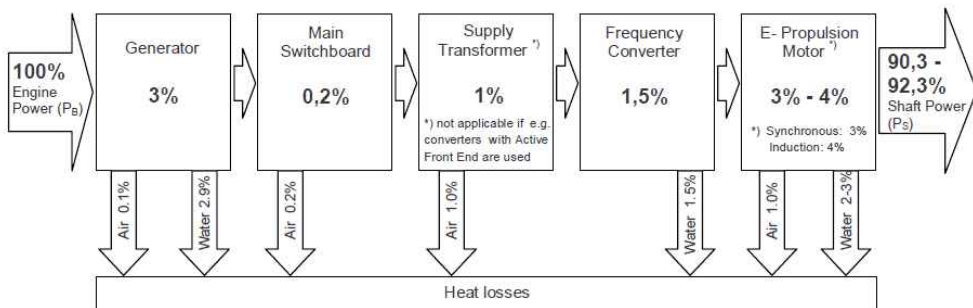


Fig. 38 Efficiencies in diesel-electric plants [11]

Fig. 39는 CODLOD 추진체계의 연료 소비량 시뮬레이션을 위한 과정을 간략하게 나타내고 있다. 함정의 저속 구간에서는 디젤 엔진 대신 추진전동기를 이용하는 운항 프로파일을 생성하여 함정 운항에 따른 연료 소비량을 산출하였다.

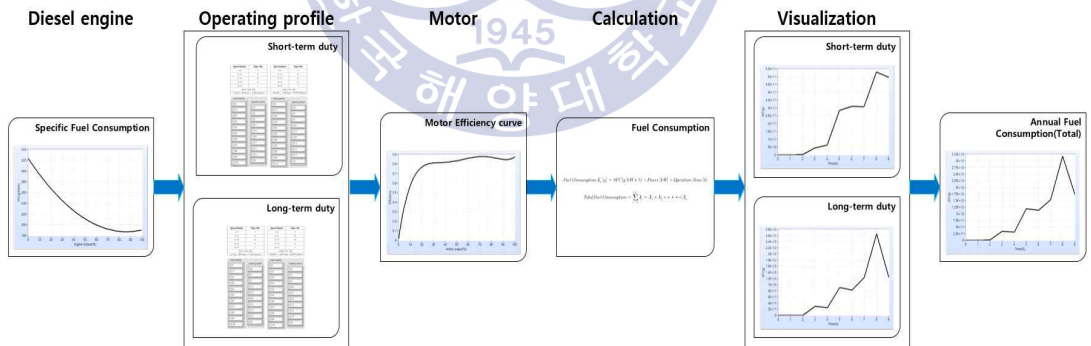


Fig. 39 Flow of simulation for CODLOD

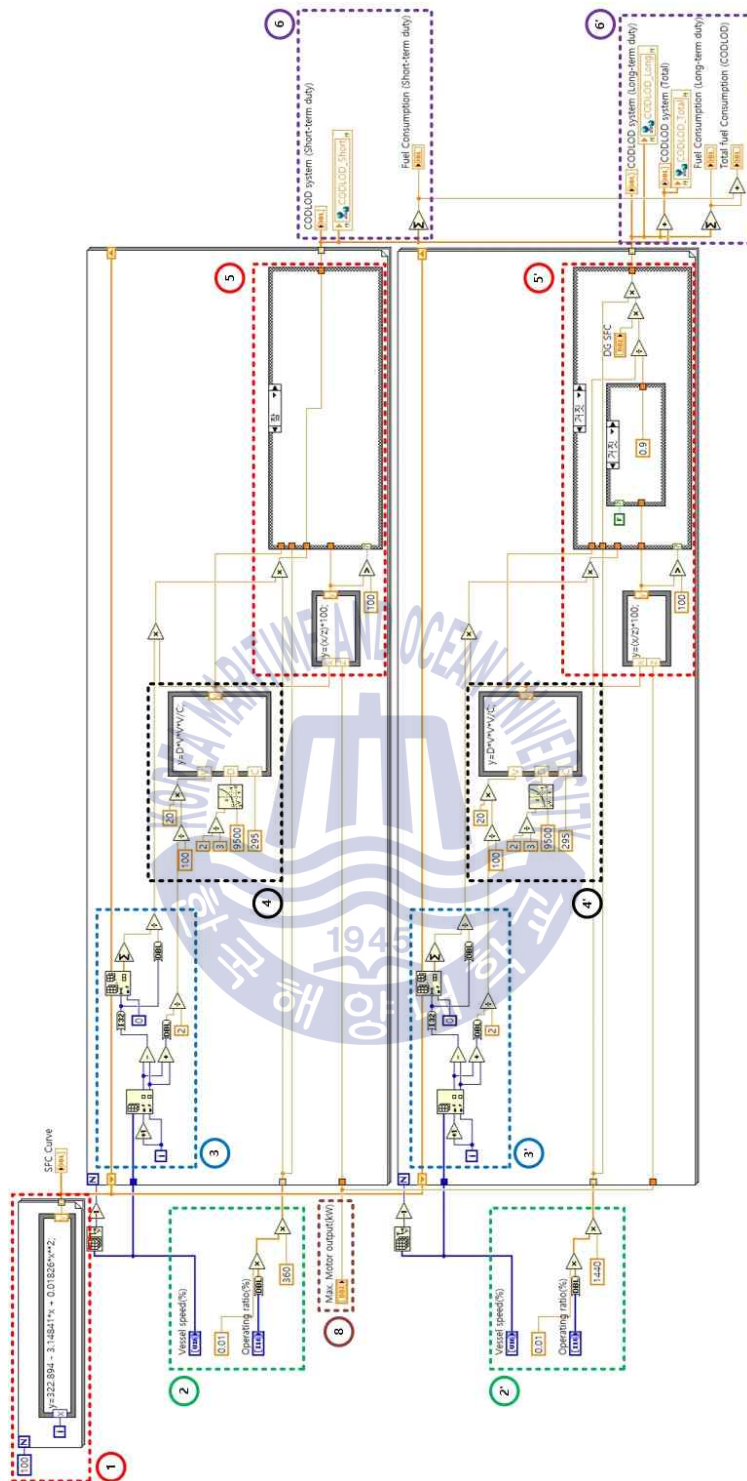


Fig. 40 LabVIEW diagram of simulation for CODLOD

Fig. 40은 CODLOD 추진체계의 시뮬레이션을 위한 LabVIEW의 다이어그램을 나타내고 있다. CODAD 추진체계와 같이 단기 및 장기 작전을 구분하여 시뮬레이션 하였다. 연료 소비율 곡선(①), 단기 작전의 운항 프로파일(②), 운항 프로파일에 따른 함속과 운항 비율(③), 함속에 대한 소요마력(④)을 산출하는 부분은 ‘5.1 CODAD 추진체계’와 동일하게 적용하였다.

CODLOD 추진체계의 특징은 함정의 저속 운항 시 디젤 엔진 대신 추진전동기를 이용하는 것이다. 이러한 특징은 Fig. 41과 같이 구현하였다. 추진전동기가 감당할 수 있는 소요 마력 구간까지 전동기의 출력에 따른 연료 소비량을 산출하도록 시뮬레이션 하였다.

추진전동기의 효율은 전 구간에서 90 %로 설정하였고 디젤 엔진의 부하율이 80 %일 때의 연료 소비율을 적용하였다.

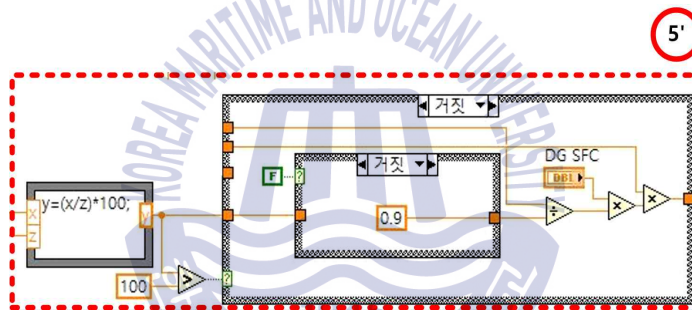


Fig. 41 Output of propulsion motor at low speed

Fig. 42는 함정의 소요마력이 추진전동기의 출력을 초과하는 고속 운항 구간부터 디젤 엔진의 연료 소비량을 구하는 부분이다.

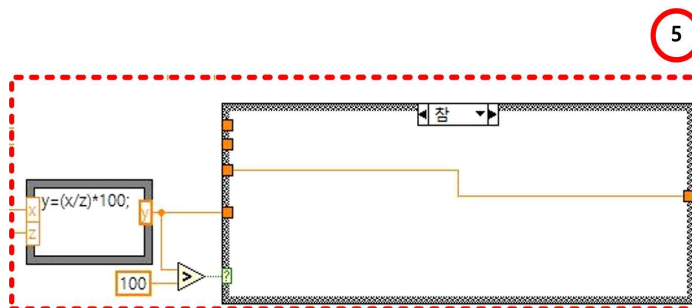


Fig. 42 Output of diesel engine at high speed

5.3 CODLAD 추진체계

CODLOD 및 CODLAD 추진체계는 저속 운항 시 유사한 방식으로 운항하지만 CODLAD는 최고 속도 구간에서 추진전동기와 디젤 엔진을 모두 운전한다. 추진체계에서 추진력을 발생할 수 있는 모든 기기를 이용하여 추가적인 속도를 얻고자 하는 것이다. 따라서 최대 부하 지점에서의 연료 소비량 산출 방식이 CODAD, CODLOD 추진체계와 다르기 때문에 추진전동기와 디젤 엔진을 함께 운전하는 운항 모드를 추가하여 구성하였다.

CODLAD 추진체계의 시뮬레이션은 연간 연료 소비량을 산출하고 합산하는 부분을 Sub VI로 구성하였다. 이때 함정의 최고 속도 구간에서는 추진전동기와 디젤 엔진의 연료 소비량을 합산하도록 하였다. 함정의 최고 속도 구간의 비율은 단기 및 장기 작전의 운항 프로파일의 1%로 설정하였다. Fig. 43, 44는 각각 CODLAD 추진체계의 시뮬레이션 과정과 LabVIEW의 다이어그램을 나타내고 있다.

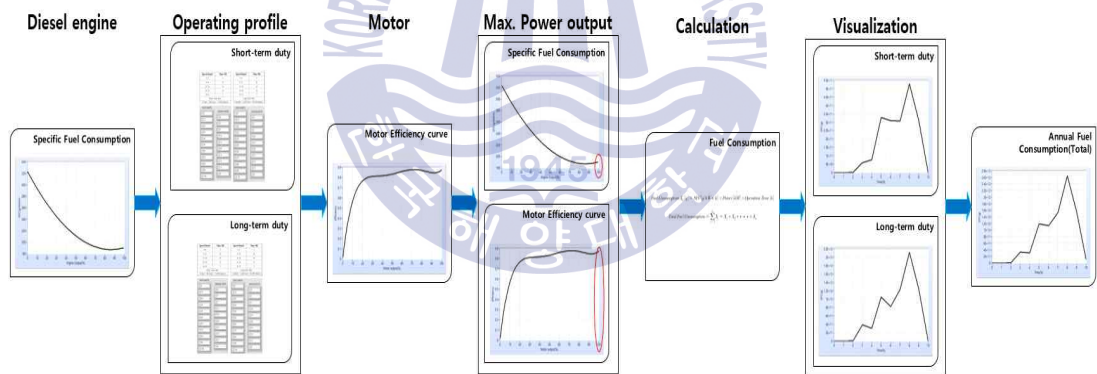


Fig. 43 Flow of simulation for CODLAD

운항 프로파일 ①, 연료 소비율 곡선 ③, 소요마력 및 연료 소비량을 계산하는 부분 ④은 CODAD 및 CODLOD 추진체계와 동일하게 구성하였다. CODLAD 추진체계의 특징인 최고 속도에서 추진전동기와 디젤 엔진이 동시에 운전되는 것은 Fig. 44의 ②번 부분을 통하여 구현하였다.

Fig. 45는 입력된 운항 프로파일로부터 함정의 최고 속력이 발생하는 구간을 찾아 디젤 엔진과 추진전동기 운전에 따른 연료 소비량을 산출하도록 한다.

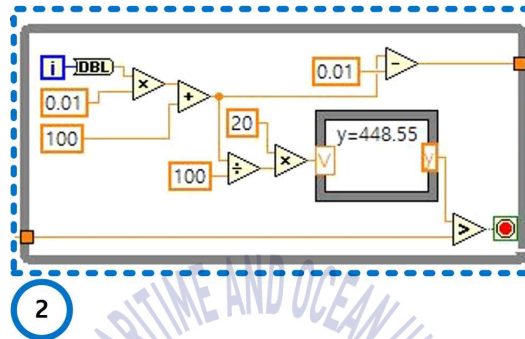


Fig. 45 Calculation of maximum horsepower requirements

Fig. 46은 전체 다이어그램의 크기를 간소화하기 위하여 연료 소비량을 산출하는 부분 ④을 Sub VI로 구성한 것을 나타내고 있다.

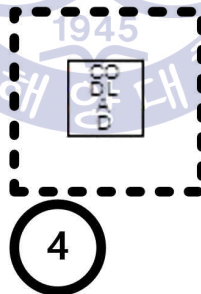


Fig. 46 Sub VI of CODLAD

Sub VI의 내부 다이어그램은 아래 Fig. 47과 같다. 번호 순서대로 운항 프로파일 ①, 연료 소비율 ②, 소요마력 ③, 추진전동기 용량 ④, 연료 소비량 ⑤, 결과 값 및 그래프 ⑥를 출력하게 된다.

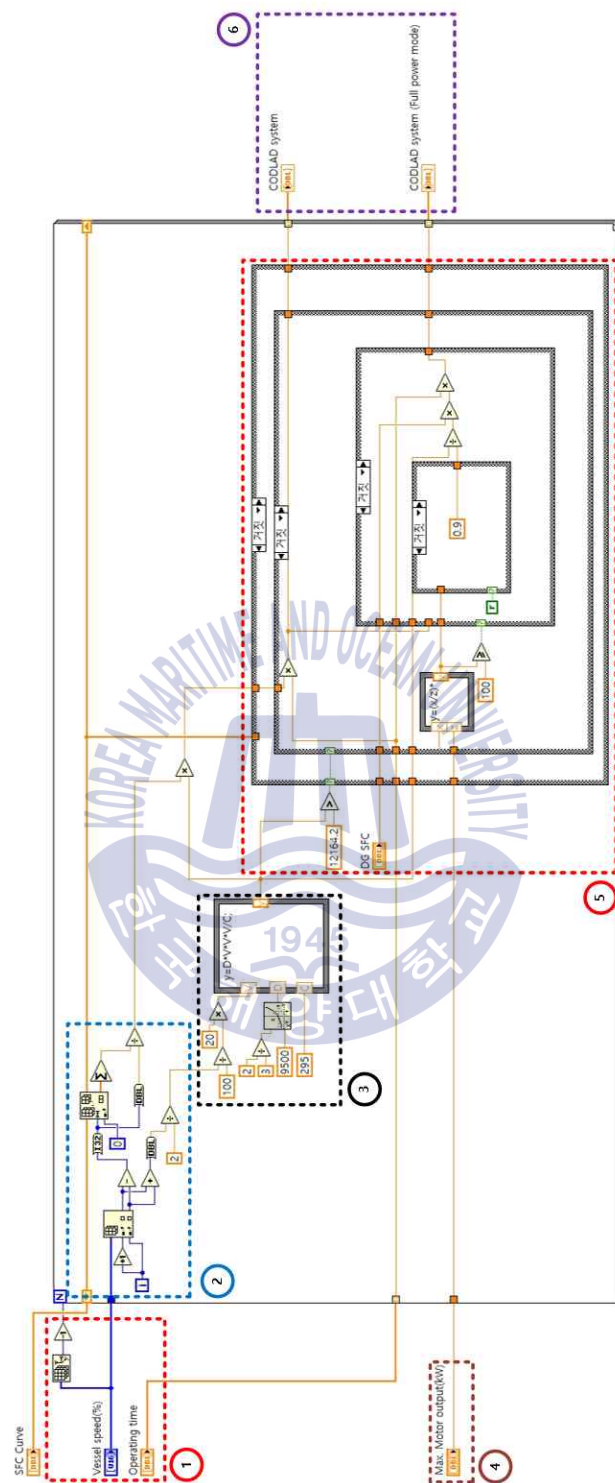


Fig. 47 Diagram of sub VI of CODLAD

5.4 시뮬레이션 결과 분석

4장에서 추정하고 설정한 내용들에 따라 CODAD, CODLOD, 그리고 CODLAD의 연간 연료 소비량을 산출하였다. 그 결과는 아래 Fig. 48, 49, 50과 같다. 그 래프에서 나타내고 있는 2점 쇄선은 단기, 쇄선은 장기 작전 시의 연료 소비량을 나타내며, 굵은 선은 단기 및 장기 작전 시의 연료 소비량을 합산하여 연간 연료 소비량을 나타낸다.

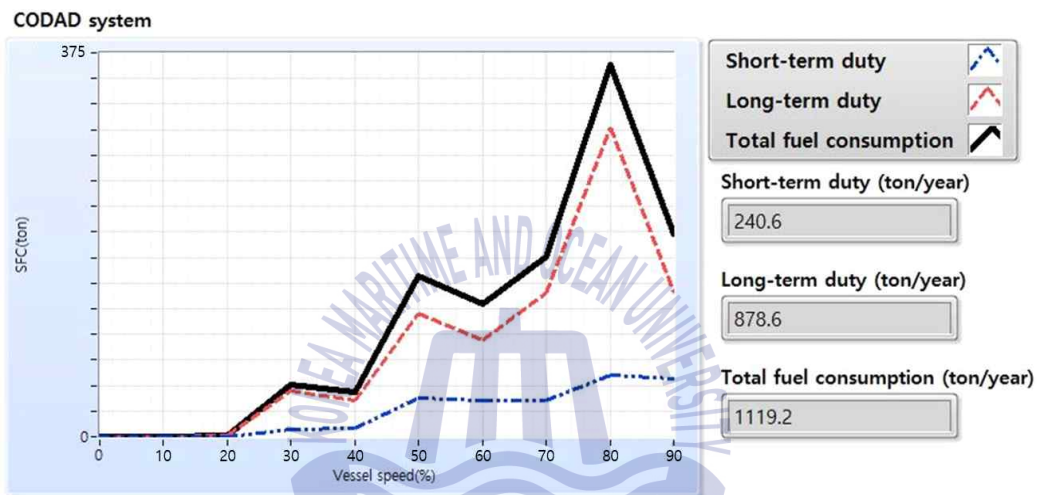


Fig. 48 Result of simulation for CODAD

Fig. 48은 CODAD 추진체계의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 단기 및 장기 작전 시 연료 소비량이 각각 240.6 ton과 878.6 ton으로, 연간 연료 소비량이 1119.2 ton으로 산출되었음을 알 수 있다. 모든 운항 구간에서 디젤 엔진의 연료 소비율만으로 연료 소비량을 산출한 결과이다.

Fig. 49는 CODLOD 추진체계의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 단기 및 장기 작전 시 연료 소비량은 각각 236.1 ton과 859.01 ton으로, 연간 연료 소비량은 1095.1 ton으로 산출되었다. CODAD 추진체계에 비하여 연간 약 24 ton의 연료를 절감하였음을 알 수 있다. 이는 12 knot까지 전동기를 이용하여 추진하였기에 디젤 엔진에 비하여 연료 효율이 높아진 것으로 볼 수 있다.

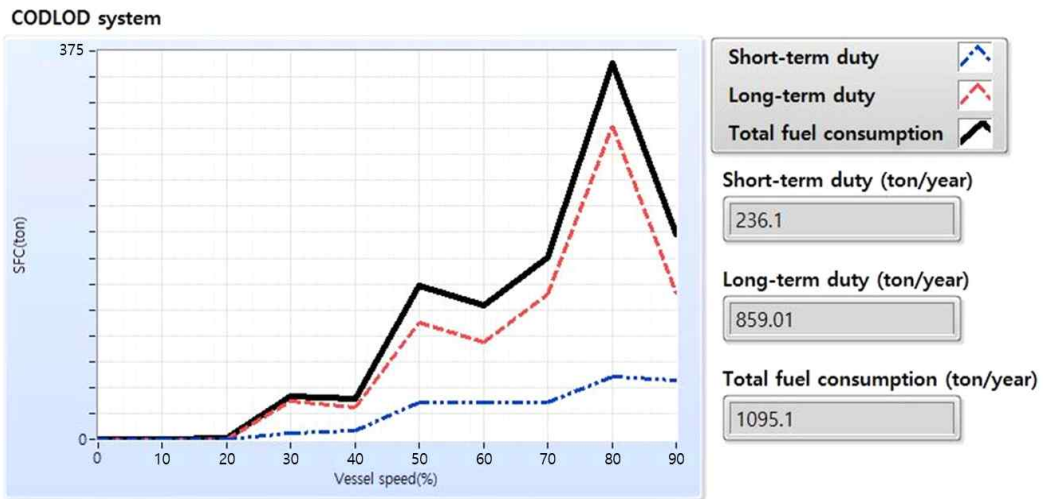


Fig. 49 Result of simulation for CODLOD

Fig. 50은 CODLAD 추진체계의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 단기 및 장기 작전 시 연료 소비량은 각각 225.8 ton과 842.5 ton으로, 연간 연료 소비량은 1068.4 ton으로 산출되었다. CODAD 추진체계에 비하여 연간 약 50 ton의 연료를 절감하였음을 알 수 있다. 여기서 CODLAD 추진체계는 CODLOD 추진체계보다 연료 소비량이 적은 것으로 산출되었는데, 이는 운항 프로파일을 백분율로 입력하여 각 속력 구간의 비율을 조정하여 나타난 결과로 보인다.

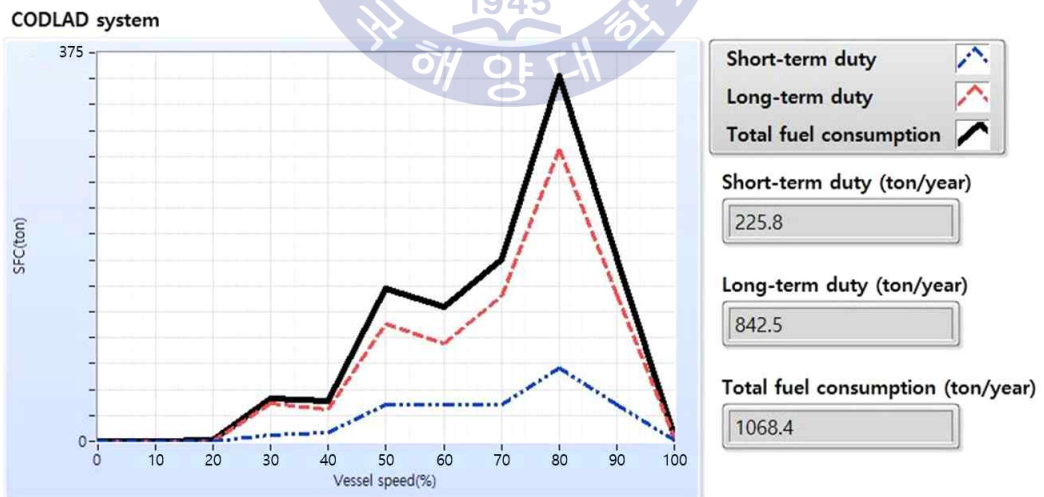


Fig. 50 Result of simulation for CODLAD system

앞서 설명한 그래프들은 연간 운항 시간을 일정한 값으로 고정시킨 상태에서 실제 함정의 운항 프로파일을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과로 함정 운항에 있어 하나의 연료 소비량의 추세로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

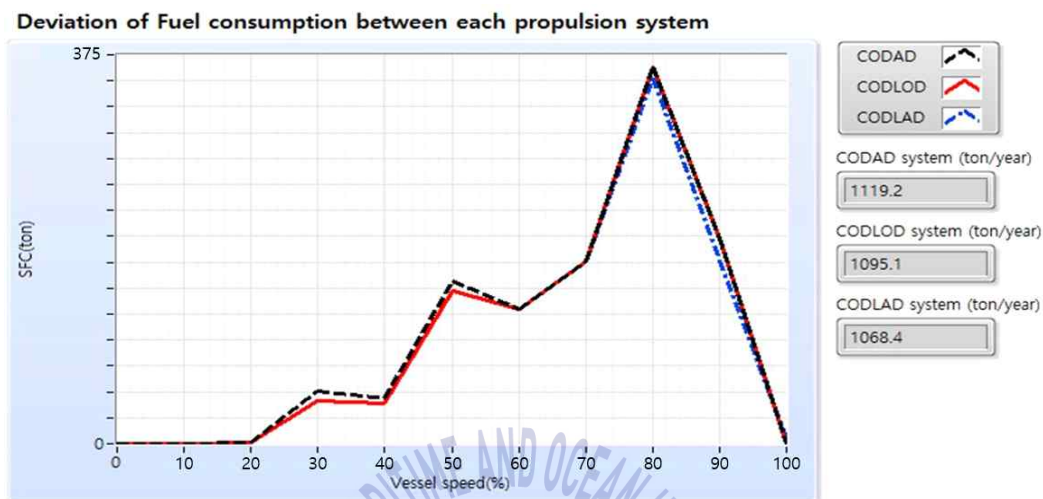


Fig. 51 Deviation of fuel consumption between propulsion systems

Fig. 51은 각 추진체계의 연간 연료 소비량을 나타내고 있다. 최고 속력의 60%까지는 추진전동기를 이용하여 함정을 운항하기 때문에 CODLOD와 CODLAD의 연료 소비량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

그러나 이후 80~90%의 속력 구간에서는 동일한 운항 프로파일임에도 불구하고 CODLAD의 연료 소비량이 미시적으로 줄어드는 구간이 발생한다. 이는 앞서 언급한 것처럼 운항 프로파일을 백분율로 입력한 후에 각 속력 구간에서의 운항 비율을 조정하면서 생긴 결과이다.

연간 연료 소비량의 측면에서만 보면 Fig. 52와 같은 효율 향상을 확인할 수 있다. CODAD 추진체계를 기준으로 CODLOD 추진체계는 약 2.1%의 연료를 절감하였고, CODLAD 추진체계는 약 4.6%의 연료를 절감하였다.

본 논문에서 가상함정으로 설정한 군수지원함은 함정 자체의 최대 전력량이 크지 않기 때문에 전동기의 용량을 일정 수준 이상으로 증대시키기 어려운 점이 있으나, 추후 실제 함정의 다양한 운항 모드, 운항 프로파일, 최대 전력량, 전동기 용량 등을 세부적으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하면 함정의 복합 추

진체계 설계에 보다 유용한 연구가 이루어질 수 있을 것으로 기대한다.

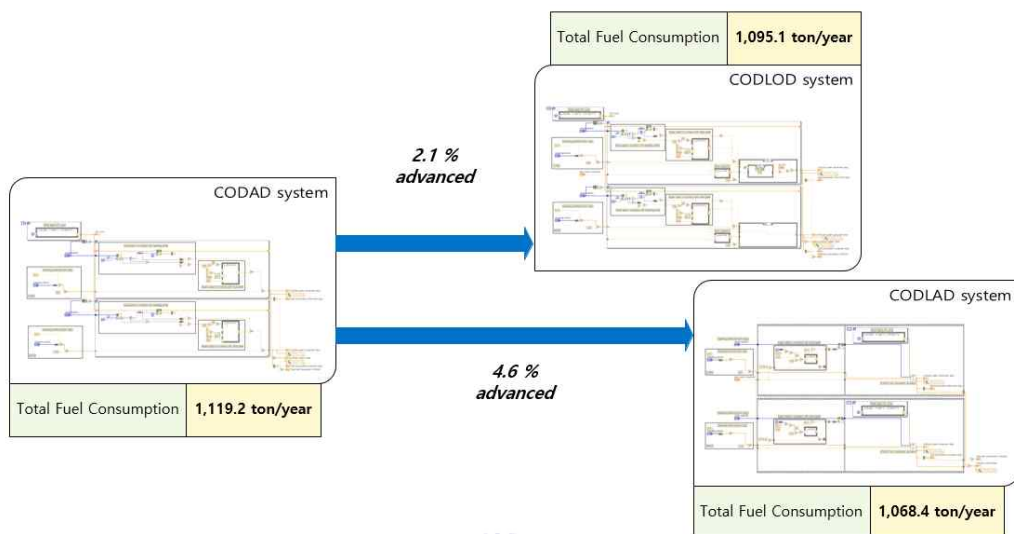


Fig. 52 Comparison of advanced efficiency



제 6 장 결 론

미국, 유럽 등 선진 해군에서는 오래 전부터 추진전동기를 이용한 복합 추진 체계를 함정에 탑재하여 운용하여 왔다. 그러나 대한민국 해군은 최근에 들어서 잠수함 공격에 대비하기 위하여 함정의 정숙성 및 생존성을 향상시킬 목적으로 복합 추진체계를 도입하고 있다.

본 논문에서는 현재 대한민국 해군에서 운용하고 있는 AOE 천지급 군수지원 함의 제원을 바탕으로 추진체계에 따른 연료 소비량을 비교 및 분석하고자 하였다. 이에 시뮬레이션을 위한 가상함정을 설정하여 기계 추진체계인 CODAD, 그리고 복합 추진체계인 CODLOD 및 CODLAD의 연간 연료 소비량 산출하여 각각을 살펴보고 비교하였다.

연간 동일한 운항 시간과 운항 프로파일에 대한 연료 소비량을 시뮬레이션 한 결과 CODAD 추진체계에 비하여 CODLOD와 CODLAD의 복합 추진체계는 각각 2.1%, 4.6%의 개선된 연료 효율을 보였다. 이는 실제 함정의 제원과 운항 프로파일을 바탕으로 시뮬레이션을 진행하였으므로 실제 복합 추진체계를 탑재 하고 있는 함정의 연료 효율과 유사한 추세를 보일 것으로 사료된다.

추후 함정의 종류 및 운항 특성에 따라 함정의 복합 추진체계가 가지는 연료 소비량 및 에너지 효율에 관하여 본 논문이 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 나아가 함정의 운항 모드에 따른 상황별 전력 소모량을 바탕으로 한 추가적인 연구가 진행된다면 추진전동기 용량을 최적화하거나 함정의 전력 체계를 설계함에 있어 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

짧은 승선 생활을 뒤로 하고 병역과 대학원 진학 사이에서 고민할 때 흔쾌히 학업의 기회를 주시고, 항상 바쁜 일정 가운데서도 부족한 후배이자 제자에게 공부와 일, 그리고 삶에 대한 자세를 가르쳐주신 오진석 교수님께 감사를 드립니다. 또한 작은 부분까지도 섬세하게 지도하시고 격려하시며, 논문을 심사해주신 소명옥 교수님, 이상득 교수님께도 마음 깊이 감사를 드립니다. 그리고 교환 교수로 해외에 계신 유희한 교수님께도 감사와 아쉬운 마음을 전합니다.

대학 시절 내내 실험실 활동을 거의 해본 적 없던 저에게 유익하면서도 유쾌한 시간들을 만들어주신 E2E 실험실의 모든 선후배님들께도 고마움을 전합니다. 뜨거운 학구열과 논리적인 시각으로 많은 가르침을 주신 정성영 선배, 항상 긍정적인 마음가짐으로 책임감 있는 모습을 보여주신 김지윤 선배, 후배들에게도 저주는 아량과 인격적인 모범을 보여주신 이현석 선배, 실험실 핵심 과제를 떠맡아 묵묵히 자기 역할을 다하는 장재희 선배, 어리지만 대학원 선배로써 의욕적인 모습을 보여준 강영민 선배, 복잡하고 낯은 일도 마다하지 않고 실험실의 많은 부분을 해결해주는 손나영 후배에게서 학문보다 소중한 많은 것을 배웠습니다. 그리고 더 잘 해주지 못한 아쉬움도 전하고 싶습니다.

부산을 마음의 고향으로 만들어주신 한국해양교회 식구들, 졸업 후 더욱 그립고 고마워진 ME65A 동기들, 자주 모이지는 못하지만 많은 추억을 공유하고 있는 죽시사 친구들, 구하기 어려운 자료와 실제 경험을 바탕으로 많은 조언을 해주신 곽준호, 백현민, 김영근 선배님께도 감사를 드립니다.

대학 1학년 때 ROTC에 면접을 가지 않고 집에 갔던 순간, 4학년 때 OSC에 합격했다가 끝내 임관을 포기했던 순간, 졸업 후 기관사로 승선하다가 어렵게 사직서를 제출했던 순간이 떠오릅니다. 생각해보면 많이 갈팡질팡 했던 것 같고 방황했던 것 같은데, 그럴 때마다 항상 믿음과 사랑으로 아낌없이 지지해준 가족들, 그리고 모든 식구들에게도 감사와 사랑을 전합니다.

참고문헌

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/ROKS_Cheonan_sinking
- [2] <http://cafe.naver.com/woorigym/2223>
- [3] Rolls-Royce, *Hybrid shaft generator propulsion system upgrade*
- [4] Timothy McCoy, Jim Zgliczynski, Niles W. Johanson, Frederik A. Puhn & Thomas W. Martin, 2007. Hybrid Electric Drive for DDG-51 Class Destroyers, *American Society of Naval Engineers*, pp.83-91
- [5] <http://livebettermagazine.com/>
- [6] Dwight Alexander, David Rummler, Aydin Mohtashmian, George Robinson, Mohamad Zahzah, Christopher T. Farr & Gregory E. Poole, 2010. Hybrid Electric Drive Evaluation for CG 47 Class Guided Missile Cruisers, *American Society of Naval Engineers*, pp.67-77
- [7] <http://www.spacewar.com/reports/>
- [8] <https://en.wikipedia.org/>
- [9] <http://www.navy.mil.kr/html/web1/001006003001.html>
- [10] Hubert F. Ohmayer, 2012. Propulsion System Choices for modern Naval Vessels, *Application Center Governmental Naval*
- [11] MAN Diesel & Turbo, *Diesel-electric Drives*, Diesel-electric Propulsion Plants, A brief guideline how to engineer a diesel-electric propulsion system
- [12] Yamada Hideki, Miyabe Hiroaki & Saeki Aiichiro, 2011. Energy Saving Technology of the Diesel-Electric Propulsion System for Japanese Coastal

- Vessels, *IHI Engineering Review*, Vol.44, No.1, pp.12-16
- [13] Nova Scotia Boatbuilders Association, *Review of All-Electric and Hybrid-Electric Propulsion Technology for Small Vessels*
- [14] David McMullen & Thomas Dalton, 2011. Hybrid Electric Drive-enhancing Energy Security, *Maritime Sys*
- [15] 이형민, 조병진, 2011. 고출력 에너지 사용 체계 플랫폼 실현을 위한 해군 함정의 통합 동력 시스템 발전 경향 분석, *한국마린엔지니어링학회*, 제 35권, 제 6호, pp.796-801
- [16] <http://news.navy.gov.au/en/Apr2016/Fleet/2905/>
- [17] 이현무, 2010. 한국해군의 군수지원함 발전방향, *한국국방연구원 주간국방논단*, 제 1307호
- [18] MAN Diesel & Turbo, *V28/33D Series Engines*
- [19] General Electric Company, *Global Offshore & Marine Solutions Guide*
- [20] Ignacio Valiente, Jose Luis Perez Diaz & David Mauricio Alba Lucero y Efren Diez Jimenez, 2010. Machine Theory Analysis of Gear Trains, Universidad Carlos III De Madrid Department of Mechanical Engineering
- [21] Xu Shanzen, Wang Cheng, 2014. Study on Clutch Control Technology and Shift Control Strategy for Automated Mechanical Transmission with Magnetic Powder Clutch, *WSEAS TRANSACTION on SYSTEMS and CONTROL*, Vol.9, pp.547-557
- [22] <http://www.modernpumpingtoday.com/driven-toward-innovation/>
- [23] MAN Diesel & Turbo, *Basic Principles of Ship Propulsion*
- [24] 조권희, 2016. 해기사를 위한 造船工學
- [25] 이수용, 2008. 造船工學概論
- [26] 백현민, 2013. 함정의 통합 동력 시스템 구성에 관한 연구

- [27] 정성영, 오진석, 2014. 이지스 구축함용 HED 시스템에 관한 연구, *한국군사과학기술학회*, 제 17권, 제 6호, pp.868-876

